



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Tecnología Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Validación de un modelo empírico para calcular, mediante láser y fotodiodo, la potencia en función de la distancia para un blanco difusor

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior

Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial

Autor: Pablo Blázquez Campo.

Tutores: Pedro Martín Mateos.
Pablo Acedo Gallardo.

Leganés, abril de 2012

Título: Validación de un modelo empírico para calcular, mediante laser y fotodiodo, la potencia en función de la distancia para un blanco difusor.

Autor: Pablo Blázquez Campo.

Directores: Pedro Martín Mateos y Pablo Acedo Gallardo.

EL TRIBUNAL

Presidente: Marta Ruíz

Vocal: Víctor Gil

Secretario: Cristina de Dios

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 18 de abril de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Resumen

Este proyecto fin de carrera se centra en un estudio teórico y experimental de un sistema de emisión/recepción, formado por láser y fotodiodo, con el objetivo de validar un modelo empírico que describa el comportamiento de un blanco difusor iluminado con un haz colimado y describa la potencia recibida en función de la distancia con el punto de reflexión.

A partir de los resultados experimentales, obtenidos y procesados mediante un software de aplicación general (Matlab) hallaremos la ecuación que describa el funcionamiento del sistema.

Será diseñado el sistema electrónico tanto para la parte de la emisión como de la recepción, teniendo en cuenta la longitud de onda a la que trabaja dicho sistema y los requisitos del mismo.

El diseño de la parte de emisión constará de un driver diseñado para controlar nuestro láser emisor; la parte de la recepción constará de un fotodiodo de área ancha. La información recibida por dicho fotodiodo será procesada por un amplificador Lock in, capaz de procesar señales de baja intensidad.

Los resultados experimentales obtenidos y procesados por Matlab serán comparados con un estudio teórico realizado, validando el funcionamiento de nuestro sistema.

Palabras clave: láser, fotodiodo, longitud de onda, experimental.

Abstract

This final project focuses on a theoretical and experimental study of a transmitter / receiver, consisting of laser and photodiode, in order to validate an empirical model that describes the behavior of a white diffuser illuminated with a collimated beam and describe the received power as a function of the distance to the reflection point.

From the experimental results obtained and processed by general application software (Matlab) find the equation describing the system operation.

The electronic system will be designed for both the portion of the emission and reception, taking into account the wavelength which the system works and its requirements.

The design of the emission part consist of a driver designed to control our laser emitter, the part of the reception comprise a wide-area photodiode. The information received by the photodiode is processed by an amplifier Lock in, capable of processing signals of low intensity.

The experimental results obtained and processed by Matlab will be compared with a theoretical investigation to confirm the functioning of our system.

Keywords: laser, photodiode, wavelength, experimental

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción y objetivos..... | 10 |
| 1.1. Introducción..... | 11 |
| 1.2. Justificación..... | 11 |
| 1.3. Objetivos..... | 12 |
| 1.4. Medios empleados. | 12 |
| 1.5. Estructura de la memoria..... | 13 |
| 2. Caracterización del sistema óptico para un blanco difusor..... | 14 |
| 2.1. Reflexión difusa. | 15 |
| 2.2. Obtención de la potencia recibida..... | 16 |
| 2.3. Conclusiones. | 18 |
| 3. Diseño del sistema emisor/receptor..... | 19 |
| 3.1. Esquema general. | 20 |
| 3.2. Componentes utilizados. | 21 |
| 3.2.1. Optoelectrónicos. | 21 |
| 3.2.2. Óptica..... | 24 |
| 3.2.3. Driver para el láser..... | 26 |
| 3.3. Circuito emisor..... | 27 |
| 3.4. Circuito receptor..... | 29 |
| 3.4.1. Prueba. | 29 |
| 3.5. Montaje en placa..... | 31 |
| 3.6. Conclusiones. | 33 |
| 4. Caracterización óptica..... | 34 |
| 4.1. Caracterización óptica..... | 35 |
| 4.1.1. Ángulo de salida de la lente. | 35 |
| 4.1.2. Superficie iluminada por el haz de luz. | 36 |
| 4.2. Caracterización de las pruebas..... | 38 |
| 4.2.1. Obtención de la capacitancia del fotodiodo. | 38 |
| 4.2.2. Respuesta del fotodiodo en función del ángulo de recepción..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3. Respuesta del fotodiodo en función de la distancia. | 39 |
| 4.3. Toma de datos con el amplificador Lock in. | 40 |
| 4.4. Conclusiones. | 41 |
| 5. Resultados obtenidos..... | 42 |
| 5.1. Resultados teóricos esperados. | 43 |
| 5.2. Resultados experimentales..... | 45 |
| 5.2.1. Emisor diodo/Receptor fotodiodo..... | 45 |
| 5.2.1.1. Prueba 1..... | 45 |
| 5.2.1.2. Prueba 2..... | 47 |
| 5.2.2. Emisor láser/Receptor fotodiodo.. | 49 |
| 5.2.2.1. Prueba 1..... | 49 |
| 5.2.2.2. Prueba 2..... | 52 |
| 5.3. Extracción del modelo matemático..... | 54 |
| 5.3.1. Programa implementado..... | 54 |
| 5.3.2. Resultados obtenidos.. | 56 |
| 5.4. Comparativa | 57 |
| 5.5. Conclusiones | 58 |
| 6. Conclusiones finales..... | 59 |
| 5.1. Viabilidad..... | 60 |
| 5.1. Mejoras futuras. | 60 |
| 5.1. Objetivos conseguidos. | 60 |
| 7. Presupuesto..... | 62 |
| 8. Referencias..... | 66 |
| 9. Anexos..... | 67 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1 - Reflexión especular.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 2 - Reflexión difusa</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 3 - Esquema óptico, reflexión difusa</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 4 - Esquema general emisión/recepción</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 5 - Emisor TIL32</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 6 - Emisor FU-450SDF</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 7 - Esquema interno FU-450SDF.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 8 - Receptor SM05PD6A</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 9 - Relación entre la λ del FU-450SDF y la responsividad en el fotodiodo</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 10 - Lente colimadora F810FC-1550.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 11 - Lente LC2969</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 12 - Colimador/lente, haz de luz.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 13 - Características lente</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 14 - Esquema interno driver ICVJZ.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 15 - Esquema circuito emisor</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 16 - Curva del driver ajustada a nuestra frecuencia</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 17 - Esquema circuito receptor.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 18 - Circuito de prueba para el fotodiodo</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 19 - Relación entre la λ del TIL32 y la responsividad en el fotodiodo</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 20 - Circuito alimentación</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 21 - Circuito fotodiodo.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 22 - Demodulador AD630.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 23 - Amplificador de salida.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 24 - Sistema óptico</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 25 - Montaje prueba 1.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 26 - Montaje prueba 2.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 27 - Montaje prueba 3.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 28 - Amplificador Lock In</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 29 - Relación teórica corriente/distancia</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 30 - Relación teórica potencia/distancia.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 31 - Respuesta del fotodiodo al variar frecuencia.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 32 - Respuesta del fotodiodo al variar el ángulo de recepción entre 0 y 60</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 33 - Respuesta del fotodiodo al variar el ángulo de recepción entre 300 y 360 .</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 34 - Medición 1, medidas de corriente</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 35 - Medición 1, medidas de desfase</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 36 - Medición 2, medidas de corriente</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 37 - Medición 2, medidas de desfase</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 38 - Curva experimental obtenida por Matlab.....</i> | <i>56</i> |

Índice de tablas

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1 - Modelos de difusor lambertiano</i> | <i>16</i> |
| <i>Tabla 2 - Relación entre distancia y potencia/corriente recibida por el fotodiodo</i> | <i>43</i> |
| <i>Tabla 3 - Caracterización fotodiodo (capacitancia)</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 4 - Caracterización fotodiodo, Vo en función al ángulo de recepción</i> | <i>47</i> |
| <i>Tabla 5 – Medición 1 con el láser FU-450SDF.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabla 6 - Medición 1, desviaciones estándar.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Tabla 7 - Medición 2 con el láser FU-450SDF</i> | <i>52</i> |
| <i>Tabla 8 - Medición 2, desviaciones estándar.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Tabla 9 - Primera medición completa con FU-450SDF</i> | <i>68</i> |
| <i>Tabla 10 - Segunda medición completa con FU-450SD</i> | <i>69</i> |

Capítulo 1

Introducción y objetivos.

1.1. Introducción.

Este proyecto tiene como propósito realizar un modelo empírico teórico y experimental de un sistema de emisión/recepción, formado por láser y fotodiodo, describiendo dicho sistema para un haz de luz colimado que actúa sobre un blanco difusor.

Se ha buscado diseñar un sistema que nos permitiera trabajar con emisores láser y fotodetectores a cierta longitud de onda, utilizando la óptica necesaria para trabajar con la señal transmitida dentro de un campo de visión determinado, para finalmente procesar la señal mediante un amplificador Lock in, que nos permitirá tratar señales de muy baja intensidad.

Posteriormente mediante el uso del programa de análisis matemático Matlab se ha descrito como funciona dicho sistema experimental, de tal forma que seamos capaces de relacionar mediante una ecuación matemática la potencia en función de la distancia a la que trabajan nuestros elementos optoelectrónicos.

Compararemos el estudio teórico con los resultados experimentales obtenidos y procesados por Matlab, viendo la relación existente entre ambos, así como su viabilidad para ser empleado para su diseño.

1.2. Justificación.

Este proyecto se muestra como la continuación y complemento de otros proyectos de desarrollo llevados a cabo en la Universidad Carlos III.

Se busca el integrar un sensor óptico de agua y hielo en un vehículo de conducción inteligente para poder avisar al usuario de dicho vehículo en la presencia de agua y hielo en la carretera.

Ya se desarrolló un estudio para demostrar la viabilidad de una técnica de medida basada en la diferencia del comportamiento del agua y del hielo en la variación de su coeficiente de absorción en función de la longitud de onda.

Aquí lo que se buscará será una forma de relacionar matemáticamente la potencia recibida por nuestro sistema en función de la distancia con el blanco difusor. Para ello realizaremos un análisis experimental del sistema para un blanco difusor, que emule tanto hielo como agua, caracterizando así el comportamiento de nuestro láser.

Lo compararemos con un modelo matemático de dispersión lambertiana, que nos permitirá describir la parte óptica para un blanco difusor, partiendo de la reflexión difusa del haz de luz incidente sobre el mismo difusor.

Con todo ello pretendemos poder integrar dicho sistema en el vehículo, para que nos proporcione unas medidas fiables que nos informen de si por el medio en el

que el coche se desplaza hay presencia de hielo o agua. Todo ello teniendo en cuenta la distancia entre nuestro sensor y el medio que queremos detectar.

1.3. Objetivos.

El objetivo principal del proyecto es el estudio experimental y modelado del comportamiento de un fotodiodo de área ancha mediante una ecuación matemática que describa su funcionamiento. Para ello realizaremos el diseño de un circuito de emisión y recepción, además de utilizar la óptica necesaria para su correcto funcionamiento. Como objetivos del proyecto tenemos:

- 1- Explicar teóricamente el funcionamiento de nuestro sistema para un blanco difusor.
- 2- Diseño del sistema óptico y electrónico que nos permita llevar a cabo los experimentos.
- 3- Caracterizar al sistema para su mejor funcionamiento.
- 4- Diseño de los experimentos a realizar.
- 5- Procesado de los resultados experimentales mediante Matlab.
- 6- Extracción de conclusiones sobre la metodología empleada y el diseño realizado.

1.4. Medios empleados.

Los medios empleados han sido proporcionados por el Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser de la Universidad Carlos III de Madrid.

Como elementos básicos de laboratorio se ha empleado el uso de osciloscopio, polímetro, fuentes de alimentación, generadores de onda, etc.

Para la toma de medidas de muy bajo nivel de señal se ha utilizado el amplificador Lock in, que nos permitirá medir la amplitud y la fase de la señal recibida por el fotodiodo.

Herramientas de software se han utilizado Matlab para la simulación de los resultados y Orcad/Layout para el diseño y fabricación de circuitos.

La fabricación de circuitos electrónicos ha sido realizada por los técnicos del departamento de Tecnología Electrónica.

1.5 Estructura de la memoria.

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- **Capítulo 1:** se realiza una introducción de los objetivos fundamentales a tratar en este proyecto, así como los medios empleados para realizar la ejecución del mismo.
- **Capítulo 2:** cálculo de dispersión de la luz en superficies no ópticas, en nuestro caso para un blanco difusor.
- **Capítulo 3:** se describe como se ha diseñado el sistema, tanto la parte emisora como la receptora, además se indican los elementos ópticos y optoelectrónicos utilizados.
- **Capítulo 4:** caracterización óptica de sistema para cumplir con los requisitos establecidos, además del diseño de los distintos tipos de pruebas para ver el funcionamiento del mismo.
- **Capítulo 5:** exponemos gráfica y numéricamente los resultados teóricos e experimentales obtenidos. También el código implementado en Matlab y los resultados obtenidos con el que nos servirán para caracterizar matemáticamente el sistema.
- **Capítulo 6:** conclusiones, metodología y diseño.
- **Capítulo 7:** se comenta el presupuesto detallado de la realización del proyecto.

Capítulo 2

Caracterización del sistema óptico para un blanco difusor.

Veremos el modelo matemático que nos permite describir la dispersión de la luz en distintos medios. Nos centraremos en la dispersión para un blanco difusor y realizaremos los cálculos que nos permitan obtener el modelo teórico de cómo se relaciona la potencia recibida por nuestro fotodiodo en función de la distancia con el punto de reflexión.

2.1 Reflexión difusa.

En la reflexión difusa el haz de luz incidente sobre la superficie será reflejado igualmente de forma aleatoria en todas las direcciones. A diferencia de la reflexión especular que el haz incidente sobre un punto de la superficie será reflejado con el mismo ángulo con el que entra en dicha superficie.

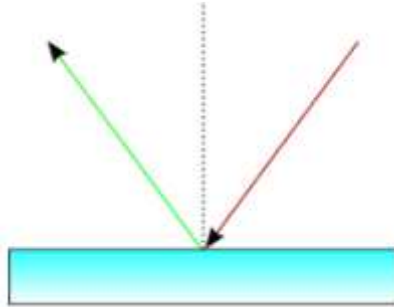


Figura 1 - Reflexión especular

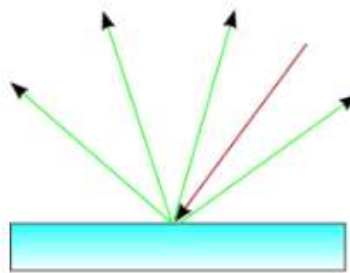


Figura 2 - Reflexión difusa

Los modelos de dispersión para ciertas superficies ópticas complejas son más complicados de desarrollar, por ello siempre es mejor trabajar a partir de mediciones reales. Cuando no es posible llevar a cabo estas mediciones utilizaremos un modelo de dispersión lambertiana que es común para algunas aplicaciones [1]:

$$BSDF = \frac{\rho}{\pi}$$

Dónde:

BSDF → Función de distribución de dispersión bidireccional

ρ → reflectividad hemisférica, acotada entre 0 y 1

A continuación mostramos el modelo lambertiano para determinadas superficies:

| [Lambertian scatter models for selected surfaces] | |
|---|-------------|
| Surface description | BSDF (1/sr) |
| Ideal white diffuser | $1/\pi$ |
| Typical matte white paper at normal incidence | $0.85/\pi$ |
| Typical diffuse black paint at normal incidence | $0.05/\pi$ |
| Ideal absorber | $0/\pi$ |

Tabla 1 - Modelos de difusor lambertiano

Utilizaremos el segundo de ellos, un difusor de papel blanco para una incidencia normal, es decir: $0.85/\pi$.

2.2 Obtención de la potencia recibida.

A continuación explicaremos teóricamente como puede funcionar nuestro sistema, al calcular como puede variar la potencia recibida por nuestro fotodetector en función de la distancia.

Nos basaremos en el estudio anterior, en la dispersión lambertiana para un blanco difusor.

En el siguiente esquema vemos como el haz de luz sale de la lente con un ángulo θ con respecto a la normal con la superficie de papel. Dicho haz llega a la superficie de papel iluminando una superficie de área $\pi * R^2$ (área de un círculo).

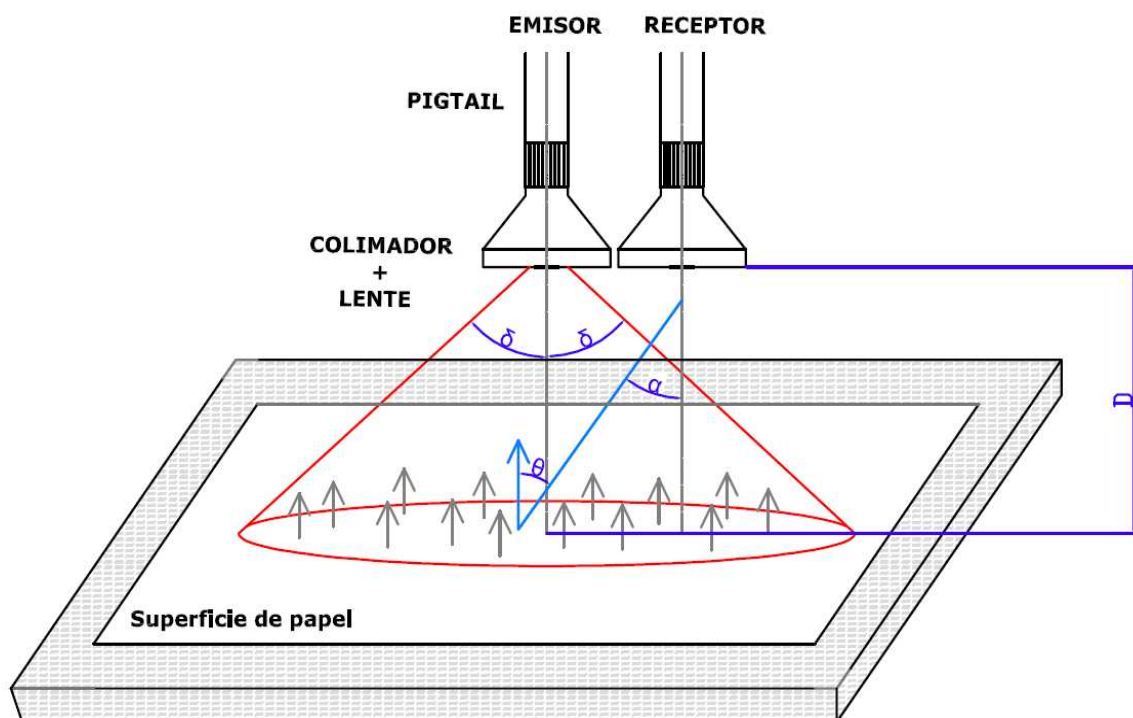


Figura 3 - Esquema óptico, reflexión difusa

La intensidad emitida por nuestro láser será proporcional a la potencia del mismo por la reflectividad hemisférica para nuestro blanco difusor, es decir:

$$I_e = \frac{0,85}{\pi} * P_e$$

Para nuestro caso particular, tomaremos que la reflectividad hemisférica es la misma en todos los puntos de la superficie de papel y que el haz de luz en dichos puntos sale reflejado con un ángulo θ de 0° . Con lo cual la intensidad en función de dicho ángulo quedaría:

$$I_e(\theta) = \frac{0,85}{\pi} * P_e * \cos(\theta)$$

Además el ángulo de salida del haz con el punto de reflexión afecta a la hora de mirar la densidad de corriente (E_c) por unidad de área, que en nuestro caso al ser 0° será máxima:

$$E_c = \frac{I_e}{D^2} * \cos(\alpha)$$

La potencia de salida de nuestro fotodiodo será proporcional a la densidad de corriente por unidad de área por el área de visión activa de nuestro fotodiodo:

$$P_o = E_c * A_{fot}$$

Finalmente podemos deducir que la potencia y corriente a través de nuestro fotodiodo son dependientes de:

- Potencia del láser (P_e).
- Tipo de superficie incidente (BSDF).
- Ángulo de incidencia (θ).
- Distancia entre emisor/receptor con el punto de reflexión (D).
- Área de visión activa del fotodiodo (A_{fot}).
- Responsividad del fotodiodo (R_{fot}).

Y quedando las formulas que describen nuestro sistema de la siguiente manera:

$$P_o = \frac{P_e * 0,85 * A_{fot}}{D^2 * \pi} * \cos(\alpha) * \cos(\theta)$$

$$I_o = \frac{Pe * 0,85 * Afot * Rfot}{D^2 * \pi} * \cos(\alpha) * \cos(\theta)$$

2.3 Conclusiones.

Hemos visto como podemos describir el sistema que queremos desarrollar, a partir de un modelo de dispersión lambertiana para un blanco difusor con una incidencia normal, obteniendo el siguiente modelo de dispersión:

$$BSDF = \frac{0,85}{\pi}$$

A partir de este modelo y según las especificaciones de nuestro láser, óptica y fotodiodo obtendremos teóricamente los valores de potencia y corriente recibida en función de la distancia con el punto de reflexión.

Capítulo 3

Diseño del sistema emisor/receptor.

En este capítulo describiremos como hemos diseñado nuestro sistema, describiendo el funcionamiento del mismo, desde la parte de la emisión formada por el láser, la parte óptica formada por el colimador y la lente y la parte de la recepción formada por el fotodiodo. Además se verá como se puede integrar el circuito de emisión/recepción en una placa impresa así como amplificar las señales de bajo nivel con un amplificador Lock In.

3.1 Esquema general.

El siguiente esquema muestra el circuito que diseñaremos:

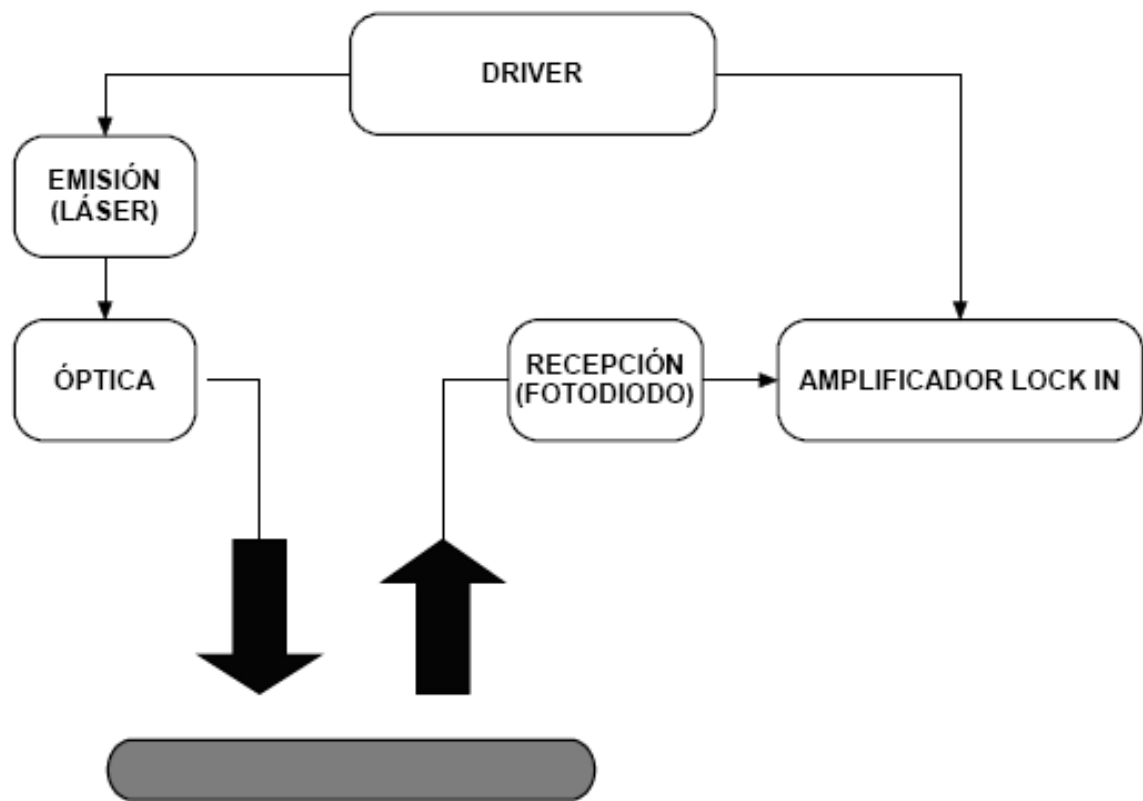


Figura 4 - Esquema general emisión/recepción

La parte de la emisión será controlada por el driver que regulara la potencia media por el láser y enviará una señal de referencia al amplificador lock in.

Este láser enviará la señal modulada a nuestro circuito receptor en el que se encuentra el fotodiodo, encargado de darnos una corriente proporcional a nuestra distancia de muestreo, dicha distancia será la que haya entre nuestro sistema emisor/receptor con el punto de reflexión.

La parte óptica tiene la función de colimar el haz de luz procedente del láser, para posteriormente pasar a través de una lente divergente que abrirá dicho haz.

Posteriormente esta corriente será llevada a nuestro amplificador lock in, donde realizaremos medidas de amplitud y fase de nuestra señal.

3.2 Componentes utilizados.

3.2.1 Optoelectrónicos.

El primer emisor que utilizamos es el TIL32 [2], es un simple emisor de luz de 3mm de diámetro, posee las siguientes características:

- Longitud de onda: 940 nm
- Corriente máxima admitida: 20 mA
- Tensión máxima admitida: 1,6 V



Figura 5 - Emisor TIL32

Utilizamos este led emisor para realizar unas pruebas para caracterizar nuestro fotodiodo receptor.

Las especificaciones de este dispositivo lo hacen idóneo para que con un simple circuito de polarización funcione correctamente, además su longitud de onda nos permite trabajar dentro de los márgenes de la respuesta espectral que nos da el fotodiodo. No permite la modulación directa de la radiación emitida, como los diodos láser, pero no es un impedimento para el uso que le daremos.

El segundo emisor que utilizaremos será el láser FU-450SDF [3] de fibra óptica de Mitsubishi, posee las siguientes características:

- Longitud de onda: 1310,5 nm
- Corriente umbral: 5,8 mA
- Eficiencia: 0,258 mW/mA
- Corriente por el fotodiodo monitor: 0,339 mA
- Potencia de emisión: 4 mW



Figura 6 - Emisor FU-450SDF

A continuación observamos los cuatro terminales que conforman el esquema interno, los dos terminales del láser y los dos del fotodiodo, que nos permite controlar la salida:

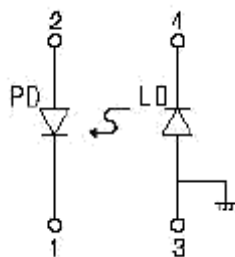


Figura 7 - Esquema interno FU-450SDF

Como receptor en todos los casos utilizaremos el fotodiodo de área ancha de visión SM05PD6A [4] de Thorlabs, posee las siguientes características:

- Respuesta espectral: 800 – 1800 nm
- Área activa de visión: 7,1 mm²
- Conector SMA
- Fabricado en germanio



Figura 8 - Receptor SM05PD6A

Para la longitud de onda de 1,31 μm del FU-450 SDF, que es nuestro emisor principal, obtenemos una responsividad del SM05PD6A de 0,9 A/W.

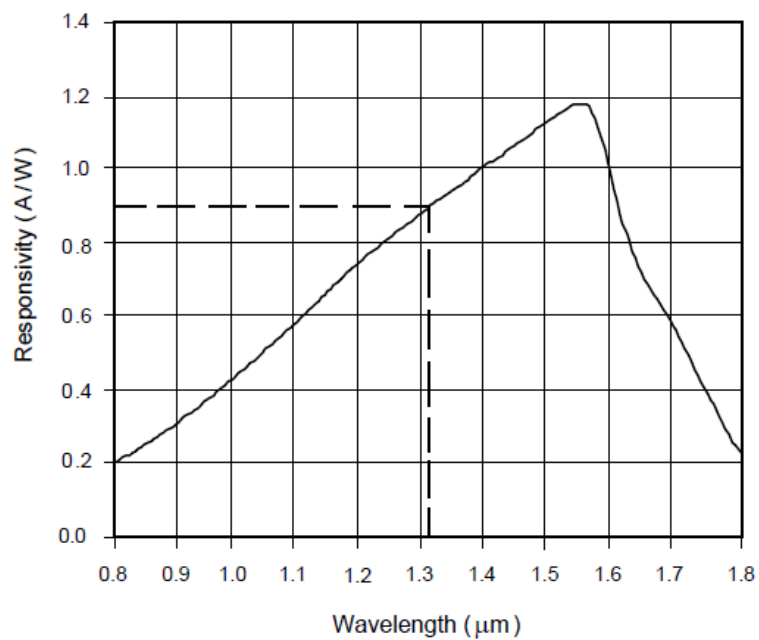


Figura 9 - Relación entre la λ del FU-450SDF y la responsividad en el fotodiodo

Esta responsividad es una medida de la sensibilidad de la luz que relaciona la corriente por el fotodiodo para una potencia incidente de luz a una longitud de onda dada (λ):

$$R = \frac{I_p}{P}$$

3.2.2 Óptica.

Como elemento óptico utilizaremos un colimador para el sistema de emisión. Se trata de la lente colimadora F810FC-1550 [5] de Thorlabs, con un ángulo máximo de divergencia de 0,016.



Figura 10 - Lente colimadora F810FC-1550

Como lente divergente utilizaremos la LC2969 [6] de Thorlabs.



Figura 11 - Lente LC2969

A continuación observamos el conjunto del colimador con la lente y vemos como el haz del láser es colimado hasta llegar a la lente divergente, donde se dispersa con un ángulo de salida Θ .

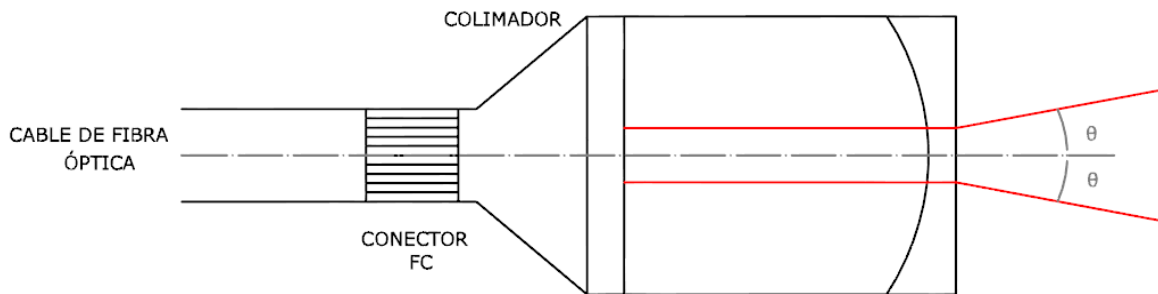


Figura 12 - Colimador/lente, haz de luz

Dicho ángulo de salida lo calculamos a partir de la distancia focal (f) de la lente y del diámetro de la misma:

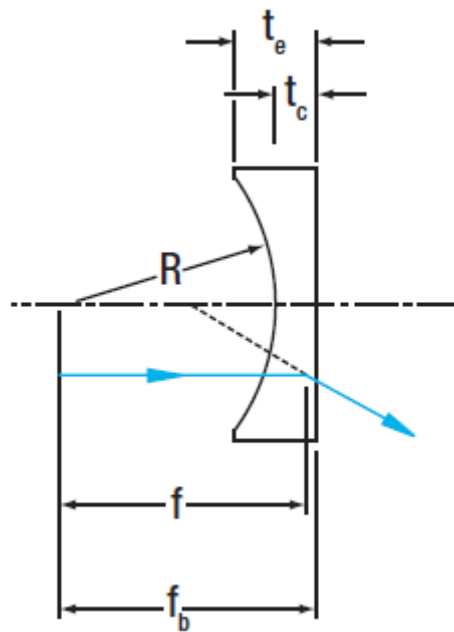


Figura 13 - Características lente

3.2.3 Driver para el láser.

Utilizaremos el driver IC-VJZ [7] de montaje superficial del fabricante IC-Haus, este driver será el controlador para nuestro láser, manteniendo una potencia media constante a través del mismo.

Posee las siguientes características a destacar:

- Frecuencia de oscilación entre 10 KHz y 4 MHz.
- Corriente media por el láser de 0,15 a 1,5 mA.
- Alimentación a 5V.

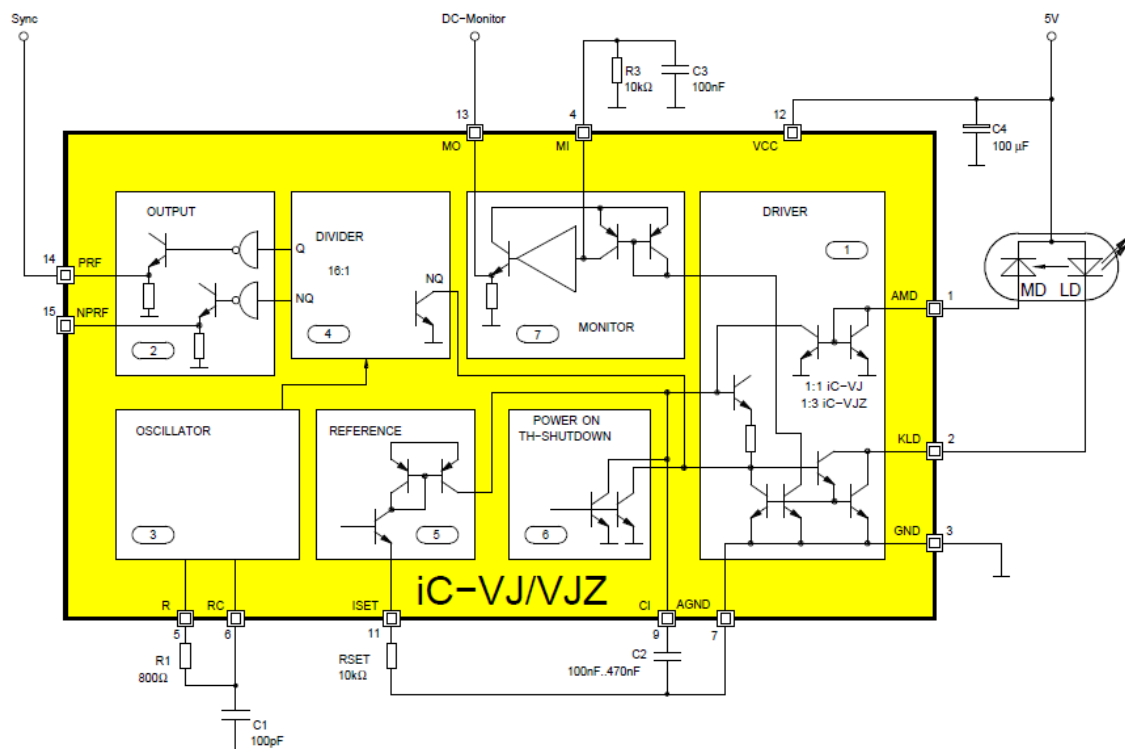


Figura 14 - Esquema interno driver ICVJZ

Incorpora las salidas PRF y NPRF que corresponde con la frecuencia del oscilador a la que lo hemos ajustado. Ambas salidas son una onda cuadrada complementaria.

También las salidas MI y MO que nos proporcionan un voltaje proporcional a la corriente media por el láser cuando instalamos un filtro paso bajo en la salida MI.

3.3 Circuito emisor.

Para implementar el circuito emisor se ha utilizado el driver IC-VJZ. Este driver nos permite controlar la frecuencia de oscilación de la señal portadora así como la potencia media por el láser.

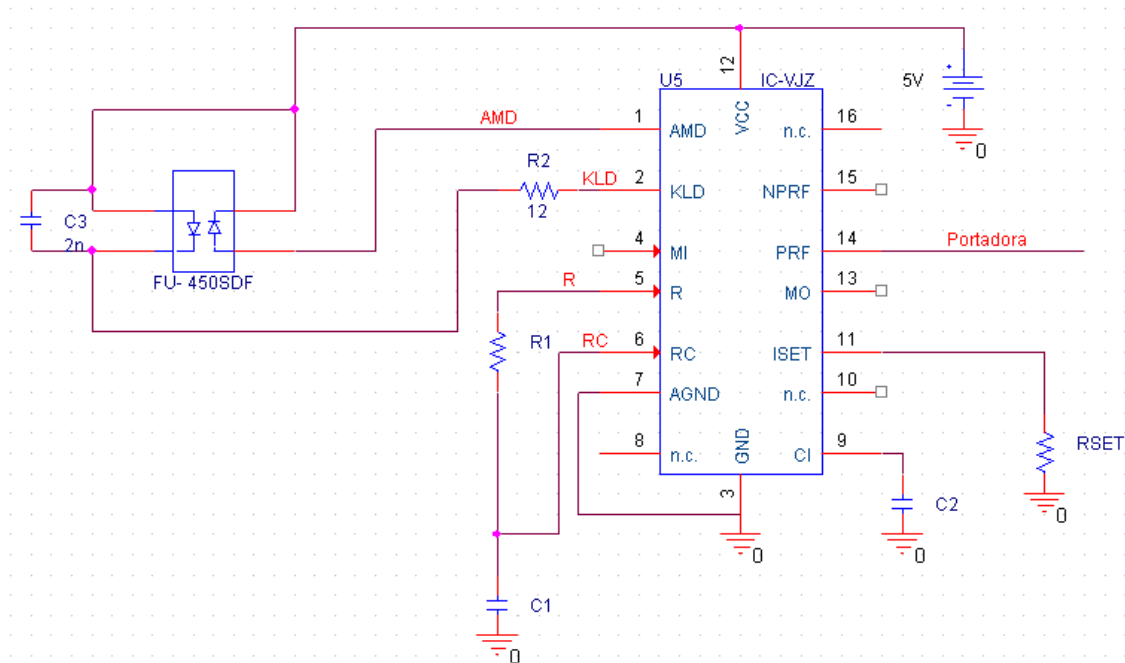


Figura 15 - Esquema circuito emisor

Optamos por una frecuencia de oscilación de 10kHz que la obtenemos a través de la siguiente grafica proporcionada por el fabricante:

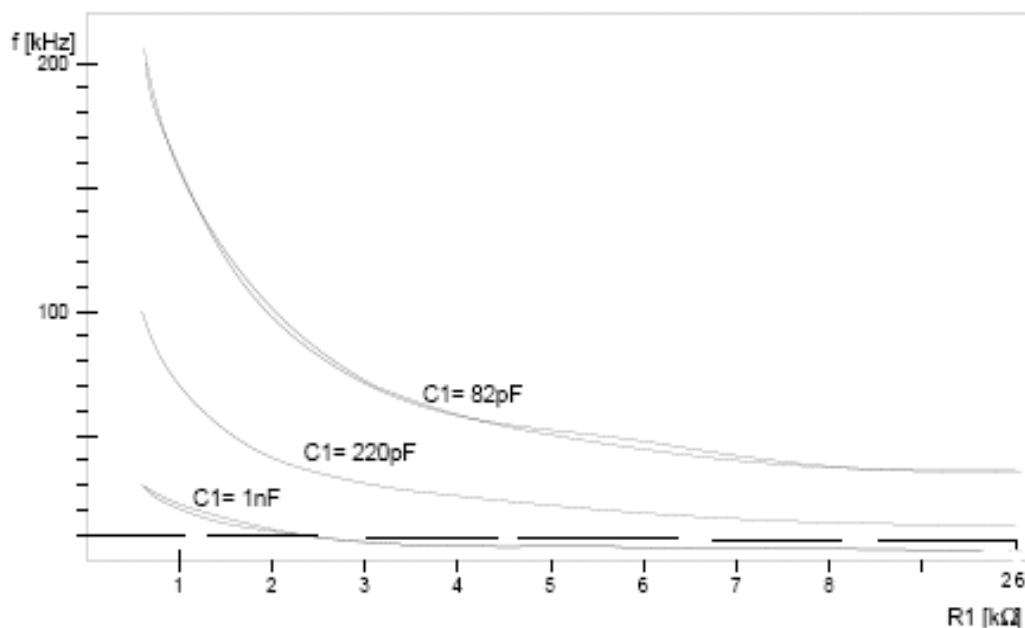


Figura 16 - Curva del driver ajustada a nuestra frecuencia

Obteniendo unos valores de:

$$\mathbf{R1 = 26,8\ K\Omega}$$

$$\mathbf{C1 = 22\ nF}$$

El control de la potencia media por el láser lo obtenemos a partir de una resistencia y un condensador colocados externamente al circuito:

$$RSET = \frac{CR1 * V(ISET)}{I(AMD)} \quad C2 \geq \frac{440 * I(ISET)}{f * V(ISET)} = \frac{440}{f * RSET}$$

Donde:

RSET → resistencia externa

C2 → condensador externo

I(AMD) → corriente por el fotodiodo monitor

V(ISET) → tensión en la patilla ISET

f → frecuencia de oscilación (10 KHz

Datos:

$$CR1 = 3$$

$$V(ISET) = 1,22$$

$$I(AMD) = 0,339\ mA$$

Obteniendo como resultados:

$$\mathbf{RSET = 10,8\ K}$$

$$\mathbf{C2 = 4,07\ \mu F}$$

3.4 Circuito receptor.

Como receptor utilizaremos el fotodiodo SM05PD6A de la casa Thorlabs, siguiendo el siguiente esquema y simulando una impedancia de entrada de 6,8 k Ω .

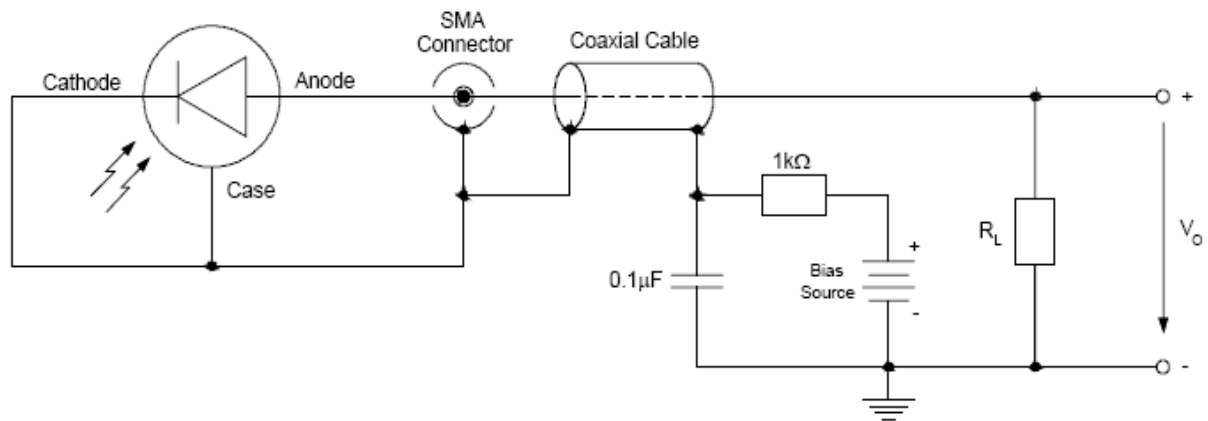


Figura 17 - Esquema circuito receptor

Utilizaremos como tensión de polarización una tensión fija $V_{dc} = 0,9V$

Nuestro fotodiodo estará polarizado en directa, es decir, el cátodo del mismo será puesto a masa.

3.4.1 Prueba.

Como prueba para caracterizar el fotodiodo diseñaremos un sencillo circuito que nos permita tener una visión general del rango de actuación del mismo.

Como emisor utilizaremos el láser TIL32 y estableceremos una corriente media por él de 10 mA.

Para la modulación empleamos una señal sinusoidal introducida por la base del circuito, el condensador es del tamaño suficiente para dejar pasar nuestras frecuencias y nos permite desacoplar la señal continua.

En el siguiente esquema se muestra el circuito empleado:

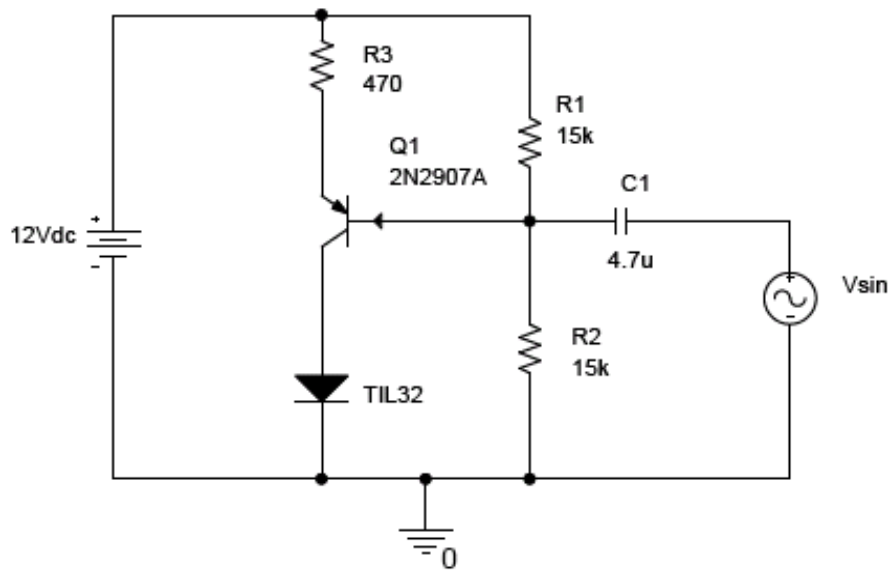


Figura 18 - Circuito de prueba para el fotodiodo

Para la longitud de onda de $0,94 \mu\text{m}$ del TIL32 obtenemos una responsividad del SM05PD6A de $0,38 \text{ A/W}$.

Dicha relación la obtenemos de la siguiente gráfica proporcionada por el fabricante:

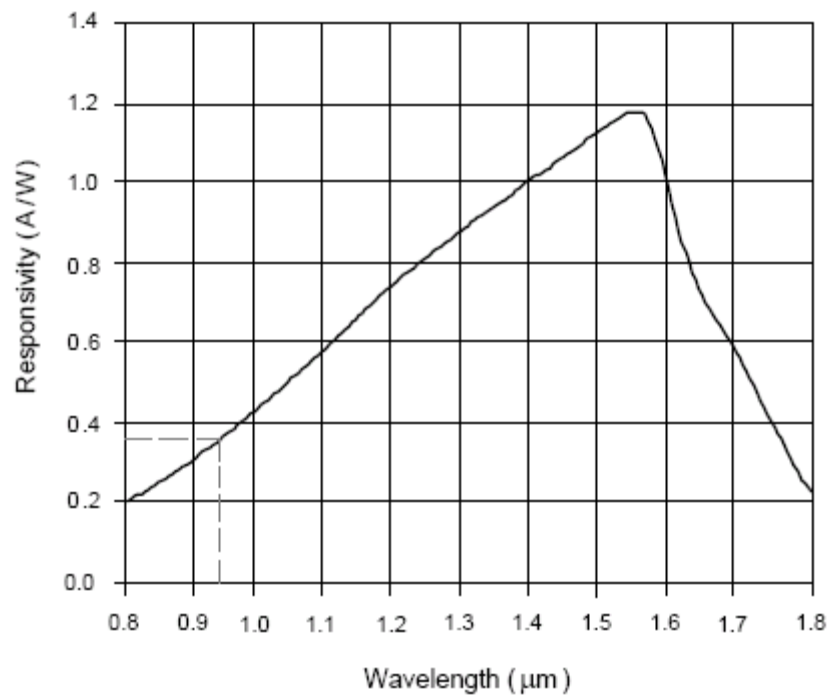


Figura 19 - Relación entre la λ del TIL32 y la responsividad en el fotodiodo

3.5 Montaje en placa.

Integramos el circuito de emisión y recepción así como el circuito para alimentar ambos en una placa.

El circuito de alimentación se base en un simple regulador cc/cc a 12V.

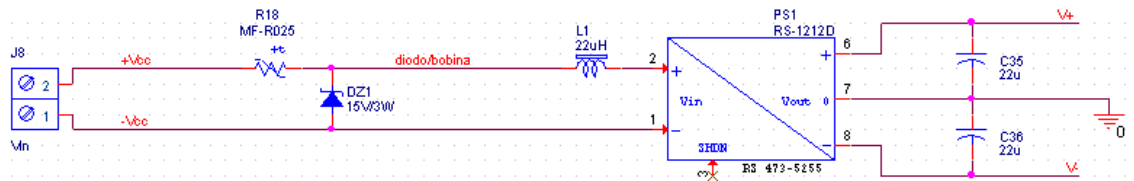


Figura 20 - Circuito alimentación

El esquema del circuito emisor es el mismo que el mostrado anteriormente, pero en el circuito receptor incluiremos algunos cambios, basados principalmente en la amplificación de la señal de salida, ya que esta será de muy bajo nivel, y la modulación de la misma.

Aquí vemos el primer amplificador a la salida del fotodiodo.

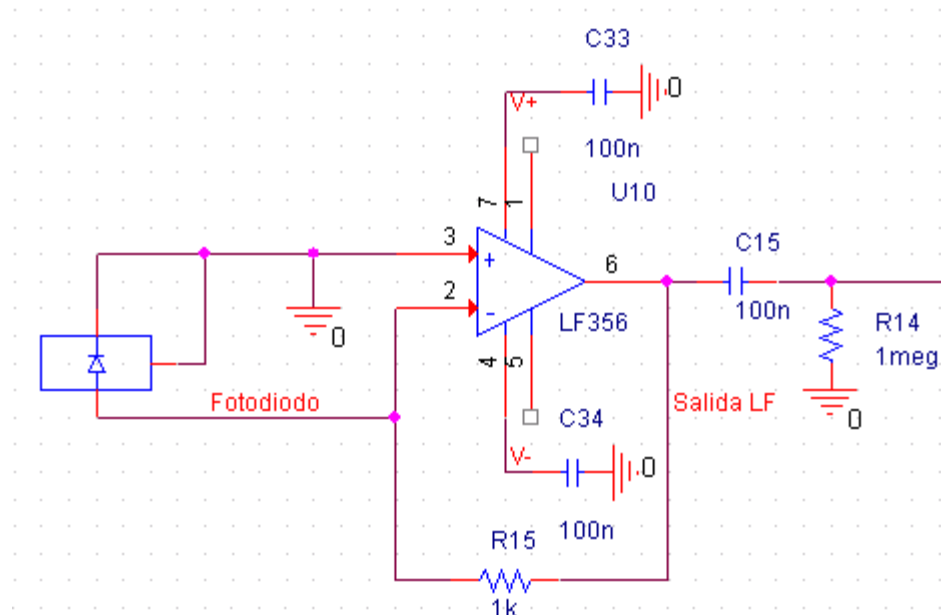


Figura 21 - Circuito fotodiodo

La señal amplificada es pasada por un filtro (UAF42) para dejar pasar solo nuestra frecuencia (10KHz) para posteriormente ser modulada y mezclada con la señal portadora que nos proporciona el driver.

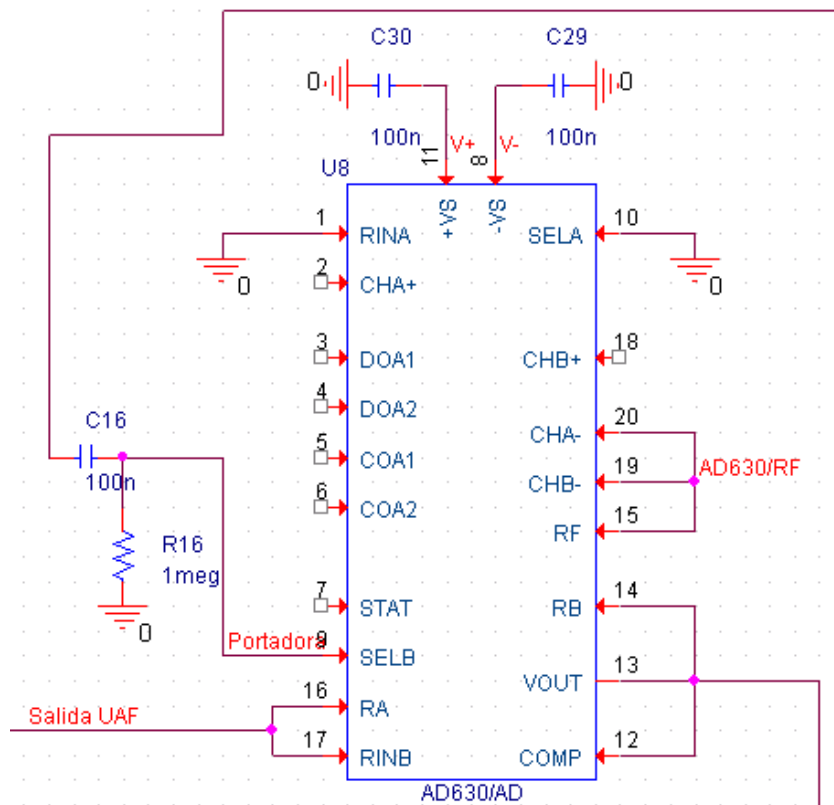


Figura 22 - Demodulador AD630

Finalmente se incluirá un amplificador, para conseguir apreciar en la salida las pequeñas variaciones de la potencia recibida.

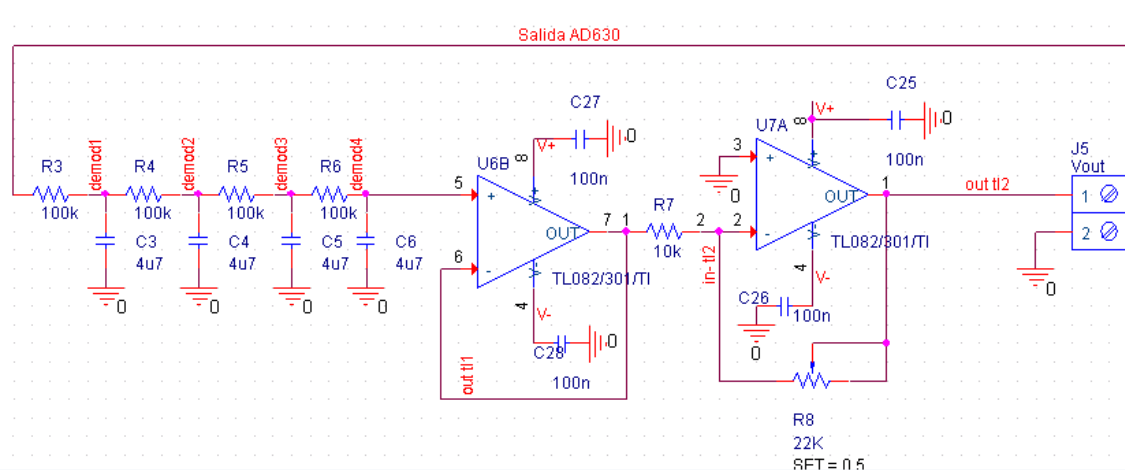


Figura 23 - Amplificador de salida

Realizamos varias pruebas con este sistema integrado en una placa, pero lo descartamos al tener el inconveniente de que el sistema era muy sensible al ruido y era imposible trabajar así para una señal de tan poco nivel, por lo que optamos usar simplemente el circuito emisor, como receptor usamos el primer circuito más sencillo y que no introducía tanto ruido al sistema como este.

3.6 Conclusiones.

Se describen los elementos principales que conformarán nuestro circuito, tanto la parte óptica como optoelectrónica y vemos como son integrados en el circuito.

Primero ajustamos el driver para que trabaje a una frecuencia de 10KHz y establezca una corriente media por el láser de 0,339 mA. Además establecemos el circuito de prueba para caracterizar nuestro fotodiodo y ver su respuesta ante diferentes pruebas.

Vemos la posibilidad de integrar nuestro circuito en una placa impresa y tras varias pruebas lo descartamos dado a la sensibilidad del sistema frente al ruido.

Capítulo 4

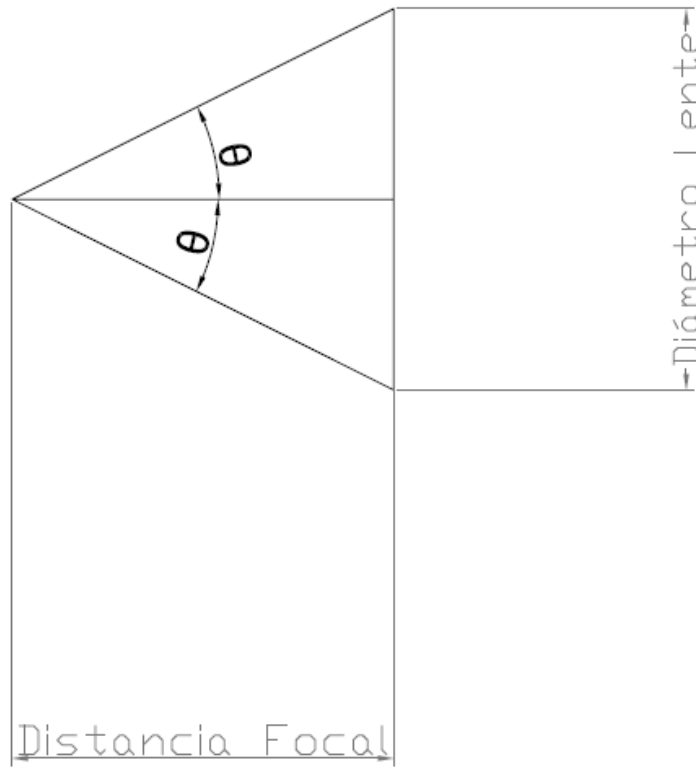
Caracterización óptica.

En este capítulo mostramos como caracterizar el sistema para que funcione de acuerdo a nuestras especificaciones y vemos los sistemas ópticos montados para realizar la toma de medidas en los diferentes procesos.

4.1. Caracterización óptica.

4.1.1. Ángulo de salida de la lente.

Para caracterizar el ángulo de salida del haz de luz que sale de la lente necesitamos saber la distancia focal y el diámetro de la lente:



Datos:

Distancia focal $\rightarrow f = 6 \text{ mm}$

Diámetro de la lente $\rightarrow D = 6 \text{ mm}$

Radio de la lente $\rightarrow R = 3 \text{ mm}$

A través de la siguiente fórmula obtenemos el ángulo de salida:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{f}$$

$$\theta = 25,56^\circ$$

4.1.2. Superficie iluminada por el haz de luz.

Para caracterizar el diámetro de la zona donde incide nuestro haz de luz necesitamos saber el ángulo de salida de la lente, que hemos calculado anteriormente y la distancia entre la lente y el punto de reflexión, en nuestro caso el blanco difusor.

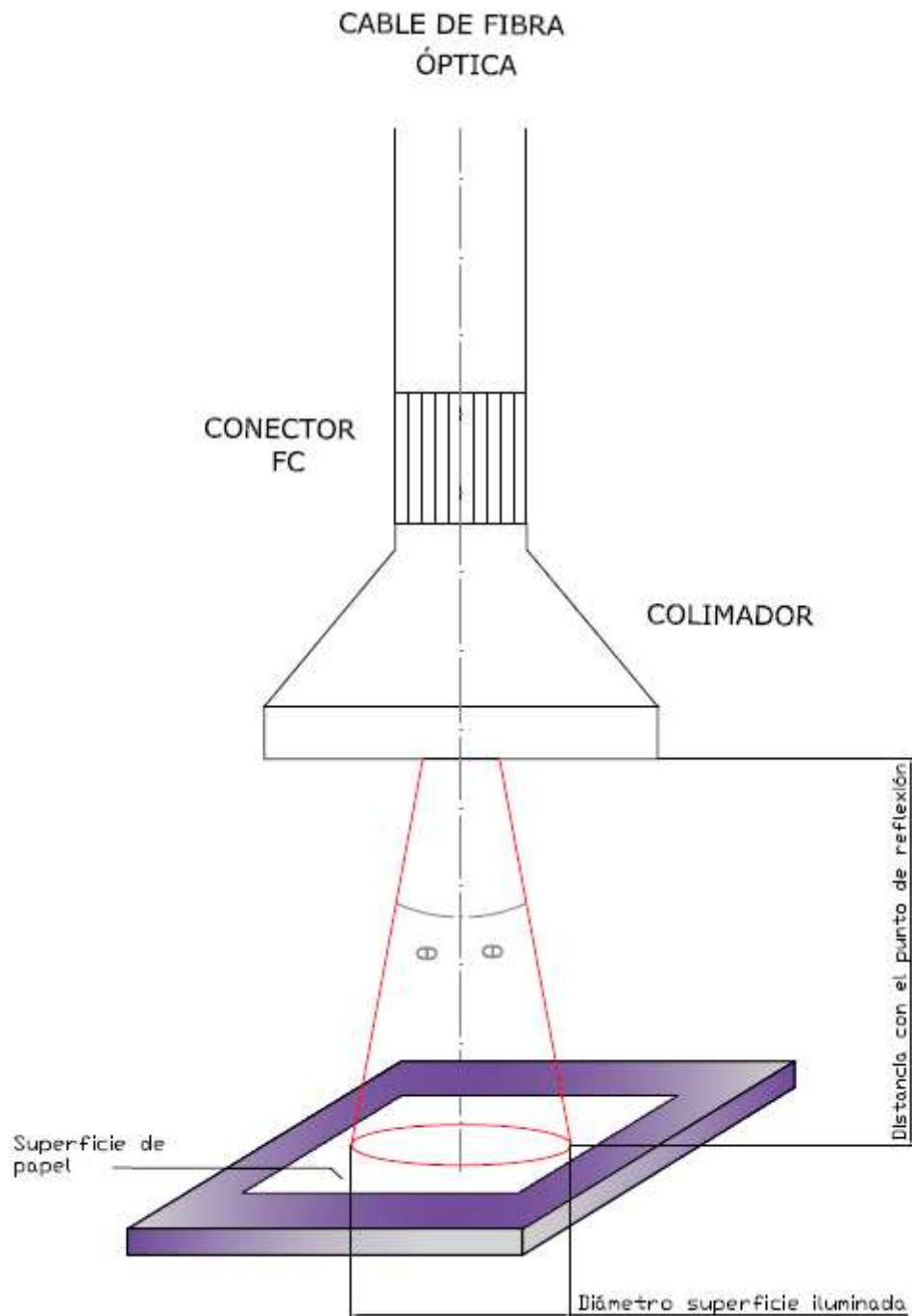


Figura 24 - Sistema óptico

Tomaremos dos distancias, la menor de 8 cm y la mayor de 40 cm, viendo el diferente tamaño de las áreas iluminadas.

Emplearemos las siguientes fórmulas:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{d}$$

$$A = \pi R^2$$

Donde:

$R \rightarrow$ radio de la superficie iluminada

$d \rightarrow$ distancia entre lente y punto de reflexión

$\theta \rightarrow$ ángulo de salida de la lente

$A \rightarrow$ área de la superficie iluminada

Para una distancia de 8 cm obtenemos el siguiente radio y área iluminada:

$$R = 3,82 \text{ cm}$$

$$A = 45,84 \text{ cm}^2$$

Para una distancia de 40 cm obtenemos el siguiente radio y área iluminada:

$$R = 19,13 \text{ cm}$$

$$A = 0,115 \text{ m}^2$$

4.2. Caracterización de las pruebas.

A continuación describimos las pruebas realizadas para caracterizar el sistema experimental, como hemos realizado el montaje de las mismas así como sus características, en las dos primeras caracterizamos el fotodiodo SM05PD6A, con la tercera caracterizamos el funcionamiento de nuestro sistema a poner en práctica.

4.2.1. Obtención de la capacitancia del fotodiodo.

Con la siguiente prueba hallaremos la capacitancia de nuestro fotodiodo, que nos limitara el ancho de banda de trabajo.

Características de la primera prueba:

- Señal de alimentación entre 1kHz - 10kHz.
- Señal de alimentación de 8,4 Vpp.
- Alineación a 0°.
- Distancia entre emisor y receptor de 10 cm.

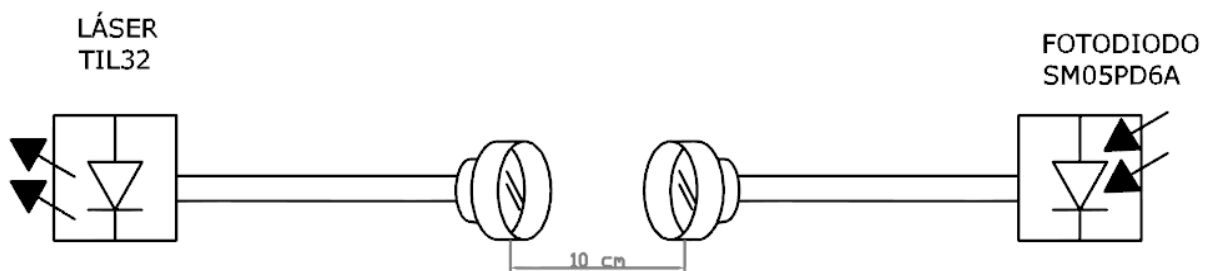


Figura 25 - Montaje prueba 1

4.2.2. Respuesta del fotodiodo en función del ángulo de recepción.

Con esta prueba veremos la respuesta del fotodiodo frente a distintos ángulos en la recepción del haz de luz, así ver cómo trabaja mejor.

Características de la segunda prueba:

- Señal de alimentación de 1 kHz.
- Señal de alimentación de 8,4 Vpp.
- Alineación entre 0° - 60° y 300° - 360°.
- Distancia entre emisor y receptor de 20 cm.

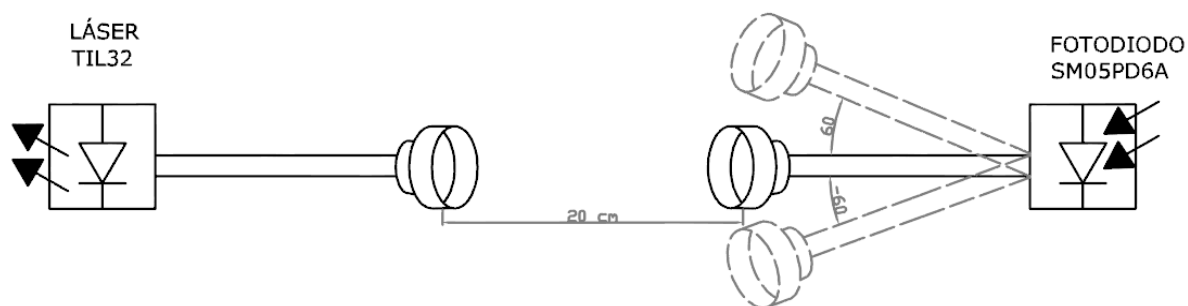


Figura 26 - Montaje prueba 2

4.2.3. Respuesta del fotodiodo en función de la distancia.

Características de la tercera prueba:

- Señal de alimentación 10kHz.
- Señal de alimentación de 5V.
- Distancia entre emisor y punto de reflexión entre 8 y 40 cm

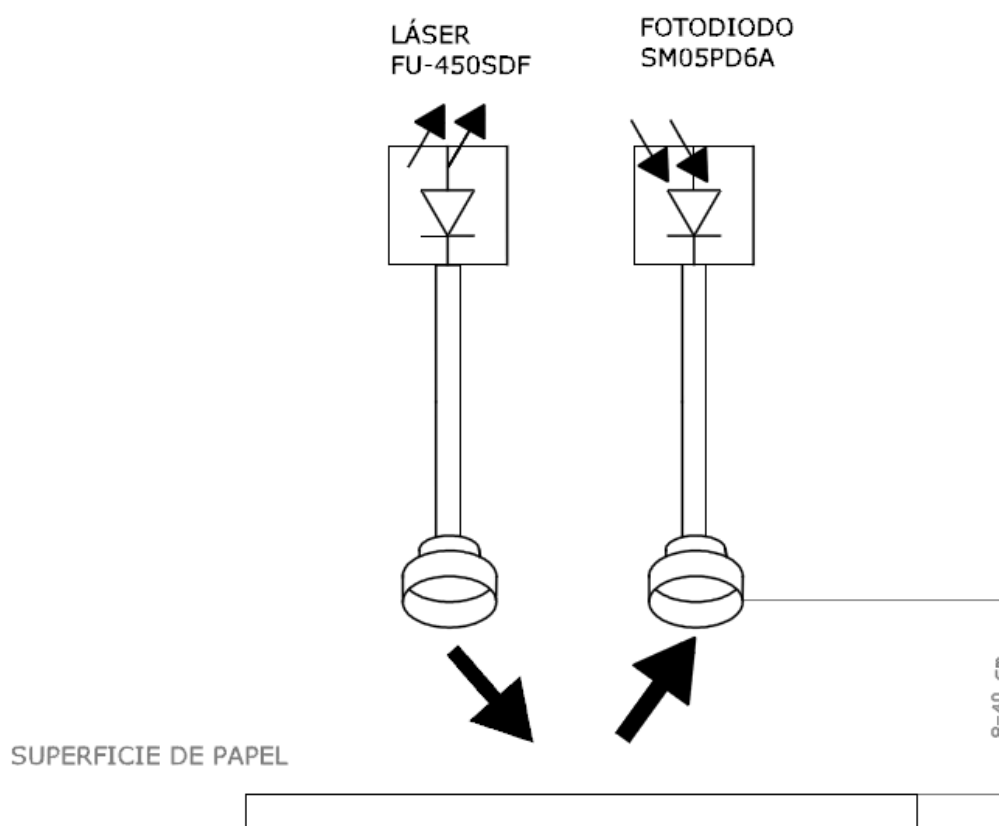


Figura 27 - Montaje prueba 3

4.3. Toma de datos con el amplificador Lock in.

Este amplificador [8] nos permite medir señales de muy baja potencia, en nuestro caso nos permitirá medir la amplitud y fase de la señal recibida en un ambiente muy ruidoso.

Para ello la frecuencia de la señal a medir (la del fotodiodo) tiene que ser la misma que la señal de referencia que le está llegando al lock-in, es decir la señal portadora. Esto lo conseguimos a través del driver que nos da la frecuencia de referencia, en nuestro caso una frecuencia de 10 kHz.

Lo utilizaremos principalmente para realizar las pruebas entre el láser FU-450SDF y el fotodiodo SM05PD6A, realizaremos medidas de la corriente que circula por el fotodiodo, que serán del orden de nA.



Figura 28 - Amplificador Lock In

Propiedades:

- Señal de referencia: 1 mHz a 102,4 KHz.
- Entrada de tensión simple o diferencial.
- Entrada de corriente con ganancia de 10^6 and 10^8 V/A.
- Más de 100 dB de reserva dinámica real.
- Constantes de tiempo para el filtrado de salida de: 10 μ s a 30 ks.

Capaz de atenuar 6, 12, 18 y 24 dB/oc.

4.4. Conclusiones.

Como ángulo de salida de la lente hemos calculado $\Theta = 25,56^\circ$, con el cual conseguimos iluminar las siguientes áreas sobre nuestro blanco difusor:

- $A = 45,84 \text{ cm}^2 \rightarrow$ a 8 cm entre lente y punto de reflexión.
- $A = 0,115 \text{ m}^2 \rightarrow$ a 40 cm entre lente y punto de reflexión.

Hemos caracterizado el sistema para 3 tipos distintos de pruebas, siendo emisor/receptor:

- Alineados perfectamente a 10cm.
- Alineados a 20 cm y variando ángulo de recepción entre $0^\circ - 60^\circ$ y $300^\circ - 360^\circ$.
- Alineados sobre un blanco difusor a una distancia variable entre 8 y 40cm.

Finalmente vemos las cualidades del amplificador Lock In que emplearemos para trabajar con las señales de baja intensidad.

Capítulo 5

Resultados obtenidos.

En este capítulo describimos los resultados teóricos calculados y los resultados experimentales obtenidos, eligiendo la curva característica más precisa que en función de los datos obtenidos nos permitirá caracterizar nuestro sistema.

Para caracterizar dicho sistema utilizamos la herramienta de análisis matemático Matlab que nos proporcionará una descripción del mismo.

5.1. Resultados teóricos esperados.

Obtenemos los siguientes resultados teóricos de potencia y corriente en función de la distancia con el punto de reflexión, tal y como fue descrito en el capítulo de introducción teórica al proyecto:

Realizamos una serie de 7 medidas entre 8 y 40 cm, que es la misma distancia a la que realizaremos nuestro ensayo experimental.

Para cada medida calcularemos la potencia y corriente que recibe nuestro fotodiodo, emplearemos las siguientes fórmulas:

$$Po = \frac{Pe * 0,85 * Afot}{D^2 * \pi} * \cos(\alpha) * \cos(\theta)$$

$$Io = \frac{Pe * 0,85 * Afot * Rfot}{D^2 * \pi} * \cos(\alpha) * \cos(\theta)$$

Datos:

Pe = 4 mW

Afot = 7,1 mm²

D = 8 y 40 cm

Cos θ = 0°

Cos α = 0°

| Distancia (cm) | Corriente Io (nA) | Potencia Po (nW) |
|----------------|-------------------|------------------|
| 8 | 1080 | 1200 |
| 10 | 691,39 | 768,21 |
| 12 | 480,13 | 533,47 |
| 15 | 307,28 | 341,43 |
| 20 | 172,85 | 192,05 |
| 30 | 76,82 | 85,35 |
| 40 | 43,21 | 48,01 |

Tabla 2 - Relación entre distancia y potencia/corriente recibida por el fotodiodo

Gráficamente obtenemos la siguiente representación, observamos cómo se aproxima a una exponencial:

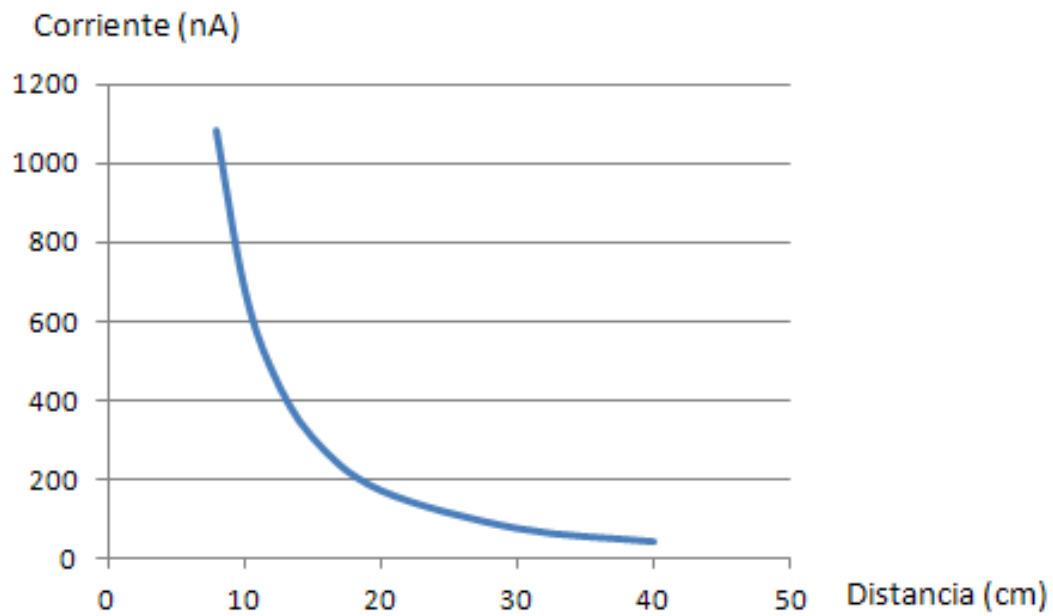


Figura 29 - Relación teórica corriente/distancia

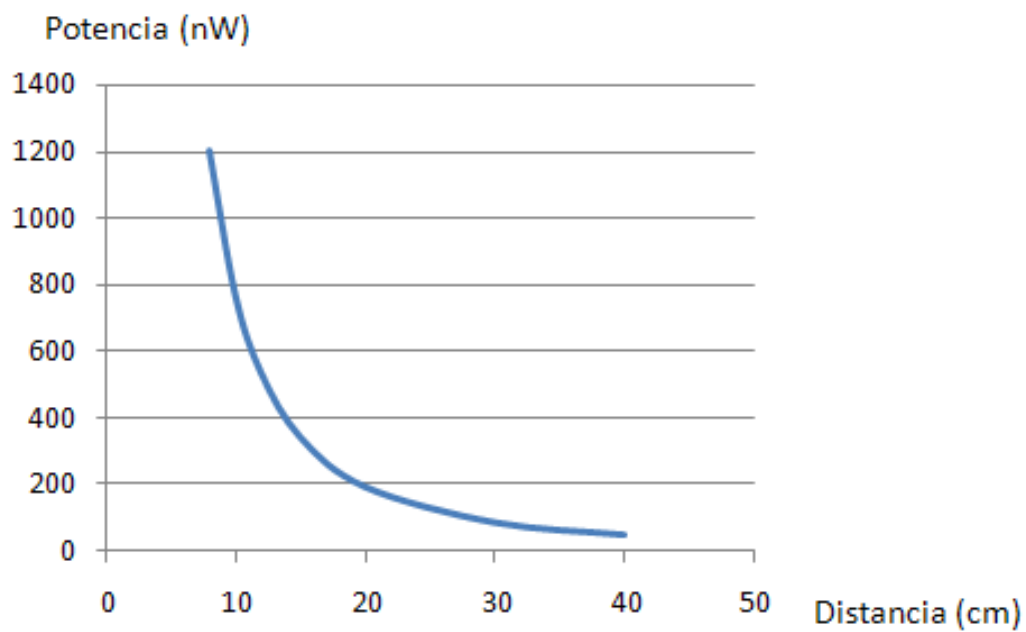


Figura 30 - Relación teórica potencia/distancia

5.2. Resultados experimentales.

5.2.1. Emisor diodo/Receptor fotodiodo.

Realizamos unas primeras pruebas con un sencillo diodo para caracterizar nuestro fotodiodo receptor.

Con la prueba 1 obtenemos la capacitancia del fotodiodo y vemos como responde al variar la frecuencia de la señal de entrada. Con ello vemos como tenemos limitado el ancho de banda (f_{BW}) de trabajo.

Con la prueba 2 vemos como a una frecuencia fija varía la tensión de salida medida en función del ángulo de recepción del fotodiodo, así veremos con que ángulo recibiremos la señal de salida con una mayor intensidad.

5.2.1.1. Prueba 1.

| Frecuencia (kHz) | Vo (mV) |
|------------------|---------|
| 1 | 74 |
| 1,2 | 72 |
| 1,5 | 70 |
| 1,7 | 68 |
| 2 | 68 |
| 2,3 | 64 |
| 2,5 | 62 |
| 3 | 58 |
| 3,5 | 53,6 |
| 4 | 49,6 |
| 5 | 41 |
| 6 | 36 |
| 7 | 31 |
| 8 | 28 |
| 9 | 24 |
| 10 | 23 |

Tabla 3 - Caracterización fotodiodo (capacitancia)

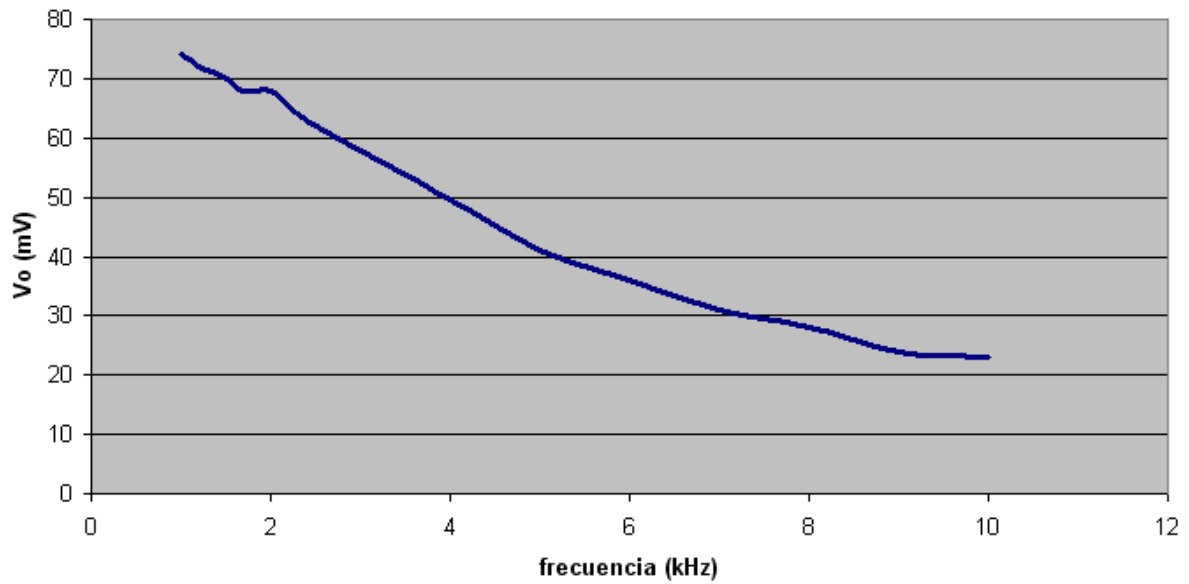


Figura 31 - Respuesta del fotodiodo al variar frecuencia

A partir de la siguiente ecuación obtendremos la capacitancia específica del fotodiodo:

$$f_{BW} = \frac{1}{2 * \pi * R_l * C_j}$$

Como impedancia de entrada tomamos 6,8 KΩ.

Para el ancho de banda tomamos el valor de -3dB, siendo de la siguiente forma:

$$74 \text{ mV} * 0,707 = 52,3 \text{ mV} \rightarrow f_{BW} = 3,6 \text{ kHz}$$

Sustituyendo en la ecuación obtenemos como capacitancia específica del fotodiodo:

$$C_j = 6,5 \text{ nF}$$

5.2.1.2. Prueba 2.

| Ángulo (°) | Vo (mV) |
|------------|---------|
| 0 | 17,2 |
| 10 | 17 |
| 20 | 16,6 |
| 30 | 15,8 |
| 40 | 12,4 |
| 50 | 6,6 |
| 60 | 1,6 |
| 300 | 1,8 |
| 310 | 6,2 |
| 320 | 12 |
| 330 | 15,6 |
| 340 | 16,6 |
| 350 | 17 |

Tabla 4 - Caracterización fotodiodo, Vo en función al ángulo de recepción

En las siguientes gráficas observamos como decae la tensión de salida recibida cuando el fotodiodo receptor no está perfectamente alineado. La variación es prácticamente la misma tanto rotando el fotodiodo en sentido horario como anti horario.

Observamos los cambios más bruscos cuando el ángulo de recepción es mayor de 30°.

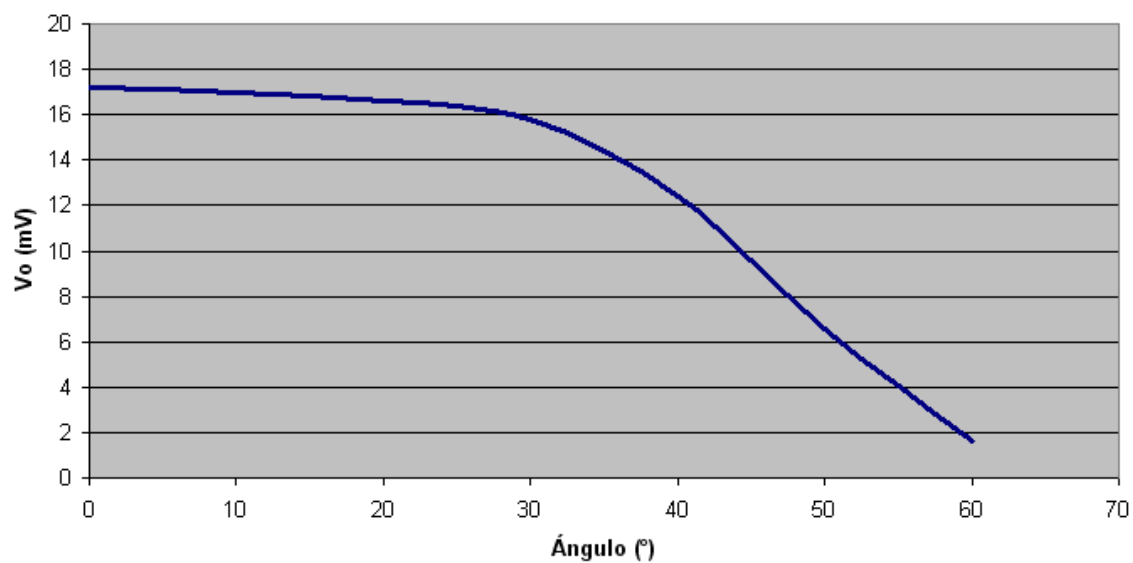


Figura 32 - Respuesta del fotodiodo al variar el ángulo de recepción entre 0 y 60

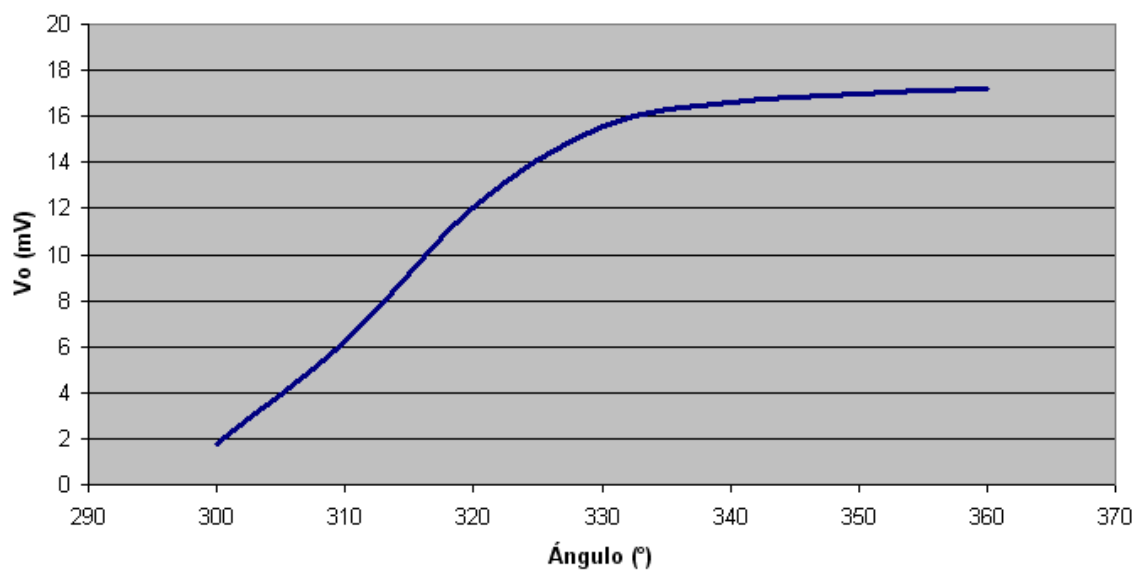


Figura 33 - Respuesta del fotodiodo al variar el ángulo de recepción entre 300 y 360

5.2.2. Emisor láser/Receptor fotodiodo.

Realizamos dos pruebas, de 8 ciclos de datos cada una, para caracterizar nuestro fotodiodo en función de la distancia.

Ambas pruebas se realizan de la misma forma y sin alterar la posición fija tanto del emisor como del receptor.

Se variará la distancia del emisor y receptor entre 8 cm y 40 cm sobre la zona de reflexión y se repetirán estas medidas durante 8 ciclos, a partir de los cuales tomaremos la media de corriente y desfase de la señal recibida.

También obtendremos los valores de la desviación estándar de los datos para comprobar la fiabilidad de los mismos sobre la media obtenida.

5.2.2.1. Prueba 1.

| Distancia (cm) | Media Corriente (nA) | Media Desfase (°) |
|----------------|----------------------|-------------------|
| 8 | 77,38625 | 17,81875 |
| 10 | 58,98875 | 17,71375 |
| 12 | 45,9425 | 17,75375 |
| 14 | 36,38625 | 17,91125 |
| 16 | 29,265 | 18,15125 |
| 18 | 23,60375 | 18,40125 |
| 20 | 19,815 | 18,68125 |
| 22 | 16,88 | 18,9975 |
| 24 | 14,855 | 20,02125 |
| 26 | 12,41 | 21,21375 |
| 28 | 10,86 | 21,6675 |
| 30 | 9,6375 | 22,27625 |
| 32 | 8,59625 | 22,83875 |
| 34 | 7,595 | 23,595 |
| 36 | 6,7175 | 24,37125 |
| 38 | 6,1075 | 25,105 |
| 40 | 5,56125 | 25,895 |

Tabla 5 – Medición 1 con el láser FU-450SDF

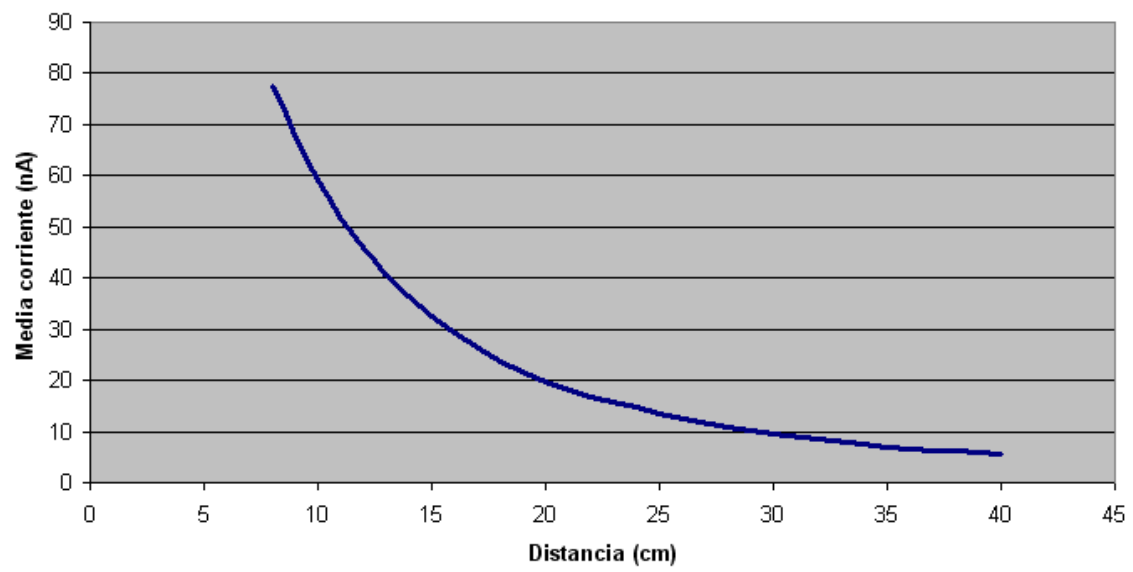


Figura 34 - Medición 1, medidas de corriente

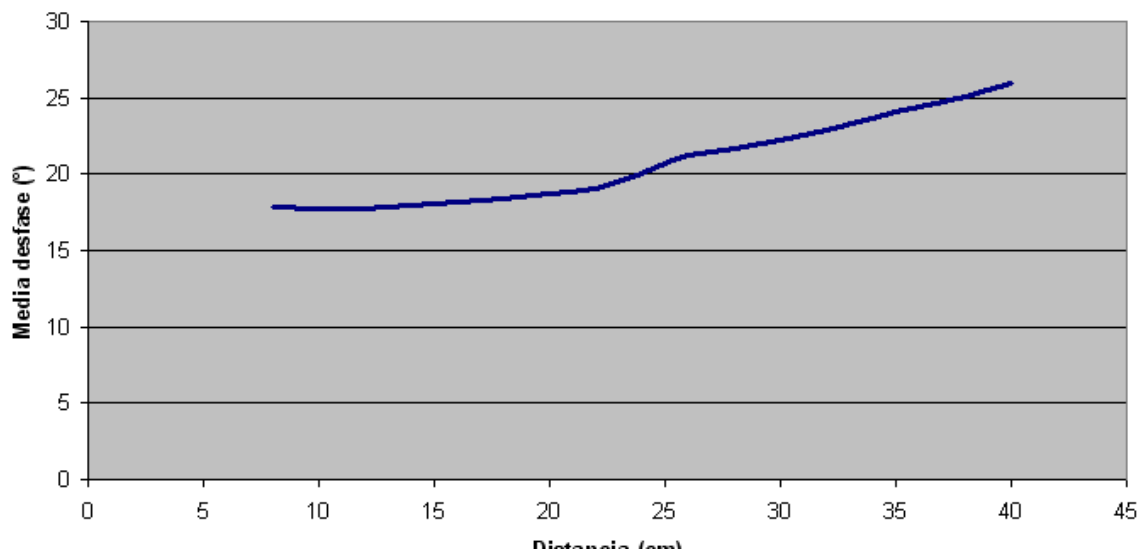


Figura 35 - Medición 1, medidas de desfase

| Distancia (cm) | Desviación Estándar Corriente | Desviación Estándar Desfase |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 8 | 3,407906511 | 1,115417122 |
| 10 | 2,165999852 | 1,087039722 |
| 12 | 1,772582861 | 1,060780541 |
| 14 | 0,844882705 | 1,086573086 |
| 16 | 1,186013732 | 0,952132006 |
| 18 | 0,867310086 | 0,962087574 |
| 20 | 0,796456438 | 0,939246468 |
| 22 | 0,628376593 | 0,990248886 |
| 24 | 0,460837746 | 1,169290841 |
| 26 | 0,509144941 | 2,716131374 |
| 28 | 0,501113047 | 2,878425909 |
| 30 | 0,418150691 | 3,043395367 |
| 32 | 0,311215933 | 3,169909586 |
| 34 | 0,318209275 | 3,31229312 |
| 36 | 0,284642633 | 3,555781761 |
| 38 | 0,245516947 | 3,790506939 |
| 40 | 0,219508379 | 3,974148606 |

Tabla 6 - Medición 1, desviaciones estándar

5.2.2.2. Prueba 2.

| Distancia (cm) | Media Corriente (nA) | Media Desfase (°) |
|----------------|----------------------|-------------------|
| 8 | 74,86 | 17,67875 |
| 10 | 57,97875 | 17,7125 |
| 12 | 45,43375 | 17,89 |
| 14 | 35,81625 | 18,33875 |
| 16 | 28,44125 | 18,78625 |
| 18 | 23,2875 | 19,29625 |
| 20 | 19,70125 | 19,615 |
| 22 | 16,53 | 20,19625 |
| 24 | 14,0775 | 20,94375 |
| 26 | 12,1525 | 21,6075 |
| 28 | 10,525 | 22,43875 |
| 30 | 9,2725 | 22,1075 |
| 32 | 8,23125 | 24,3375 |
| 34 | 7,34875 | 25,2925 |
| 36 | 6,5475 | 30,2475 |
| 38 | 5,89 | 27,56625 |
| 40 | 5,355 | 28,68125 |

Tabla 7 - Medición 2 con el láser FU-450SDF

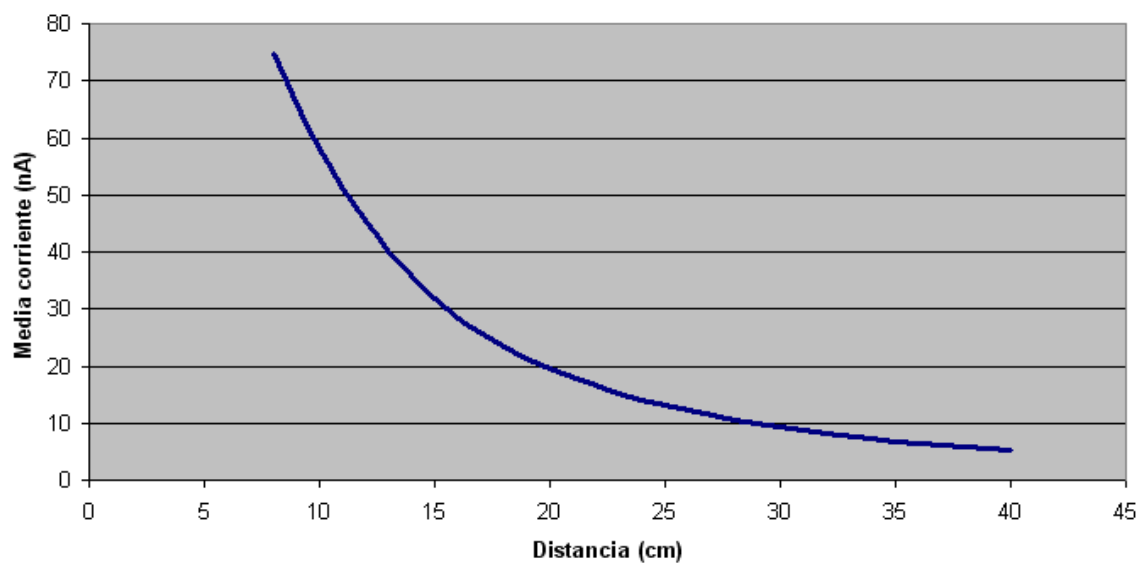


Figura 36 - Medición 2, medidas de corriente

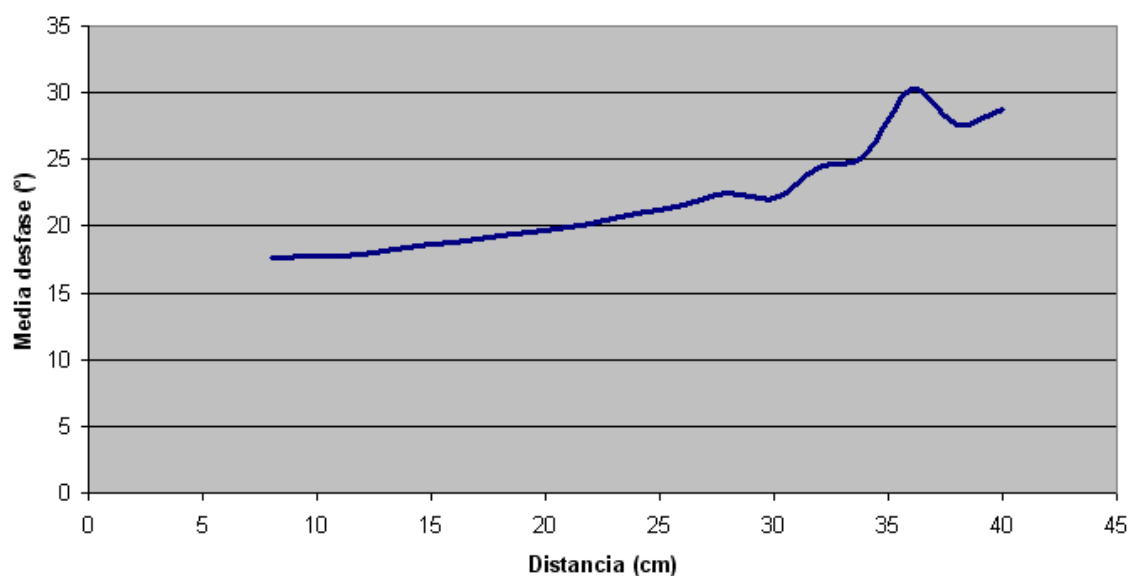


Figura 37 - Medición 2, medidas de desfase

| Distancia (cm) | Desviación Estándar Corriente | Desviación Estándar Desfase |
|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 8 | 1,830003903 | 0,613501368 |
| 10 | 1,862398128 | 0,561242245 |
| 12 | 1,266546908 | 0,582040745 |
| 14 | 0,853228114 | 0,430164005 |
| 16 | 0,753476467 | 0,457600496 |
| 18 | 0,505674938 | 0,497822042 |
| 20 | 0,698415298 | 0,478539445 |
| 22 | 0,322446009 | 0,559028175 |
| 24 | 0,528278877 | 0,696377104 |
| 26 | 0,167225254 | 1,422128686 |
| 28 | 0,181580364 | 1,551353672 |
| 30 | 0,157457477 | 3,400771971 |
| 32 | 0,145841156 | 1,953515147 |
| 34 | 0,137262782 | 2,151416477 |
| 36 | 0,152760316 | 11,62759003 |
| 38 | 0,126942057 | 2,598933504 |
| 40 | 0,159642458 | 2,945264662 |

Tabla 8 - Medición 2, desviaciones estándar

5.3. Extracción del modelo matemático.

Como herramienta para encontrar una expresión matemática que describa nuestro sistema experimental utilizamos el programa de análisis matemático Matlab, el cual nos permitirá encontrar una ecuación que se ajuste lo más fielmente posible a nuestro modelo experimental.

5.3.1. Programa implementado.

El siguiente código lo utilizaremos para sacar el modelo matemático más preciso que describa nuestro sistema experimental según la ecuación:

$$P = a + b * D^{-2}$$

Siendo a y b dos valores constantes, los cuales es nuestro objetivo hallar; D es la distancia entre el emisor y el punto de reflexión y P es la potencia obtenida para dicha distancia.

El funcionamiento del programa se basa en un sencillo muestreo mediante bucles para distintos valores de a y b, los cuales van siendo insertados en la ecuación anterior y comparados con los valores experimentales.

Al final de dicho muestreo nos quedaremos con los valores de a y b que nos proporcionen un menor error en comparación con los valores experimentales.

A continuación mostramos el código implementado en Matlab:

```
pexperimental = [74.86, 57.97875, 45.43375, 35.81625, 28.44125, 23.2875,
19.70125, 16.53, 14.0775, 12.1525, 10.525, 9.2725, 8.23125, 7.34875, 6.5475,
5.89, 5.355];

distancia = 0.08:0.02:0.4;

errormin = 1e6;

for a = 5.4:.0001:5.6

    for b = 0.3:0.0001:0.6
```

```
    pcalculada = a + b*distancia.^(-2);  
    error = sum((pexperimental - pcalculada).^2);  
    if (error < errormin)  
        amin = a;  
        bmin = b;  
        errormin = error;  
    end  
end  
end
```

5.3.2. Resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos según la simulación son:

$$a = 5,4245$$

$$b = 0,4922$$

Quedando de la siguiente manera la ecuación que describe el funcionamiento del láser:

$$P = 5.4245 + 0.4922 * D^{-2}$$

En la siguiente gráfica vemos comparados los resultados experimentales (azul) con el resultado proporcionado por Matlab (rojo):

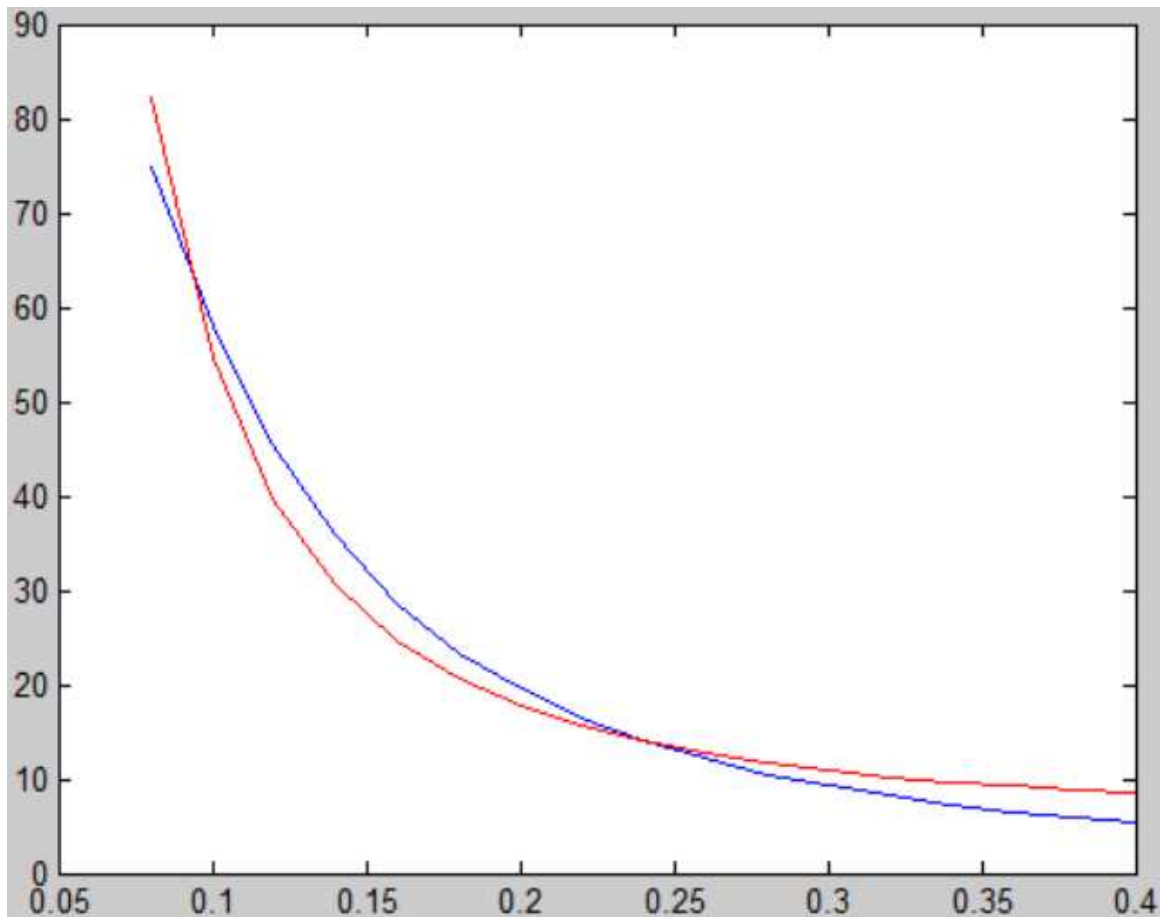
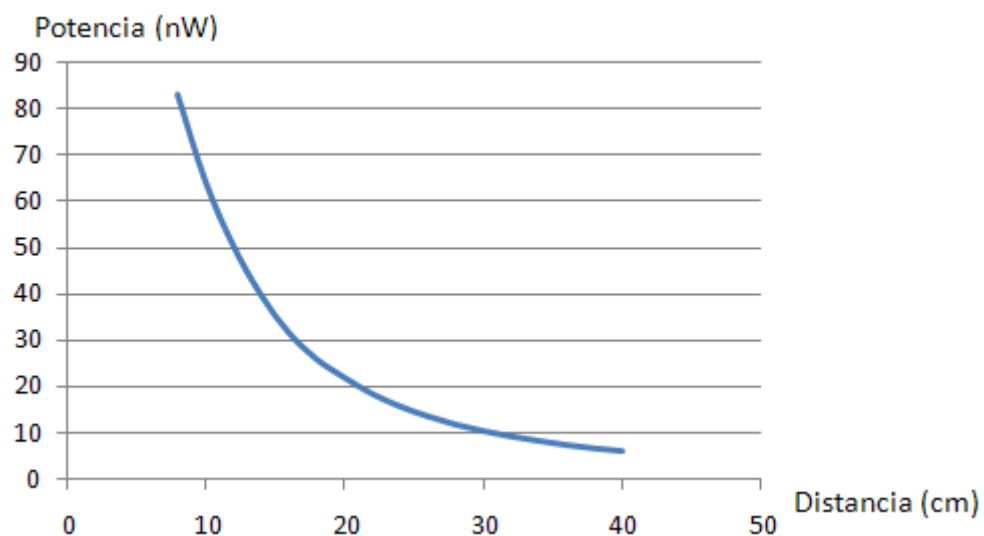
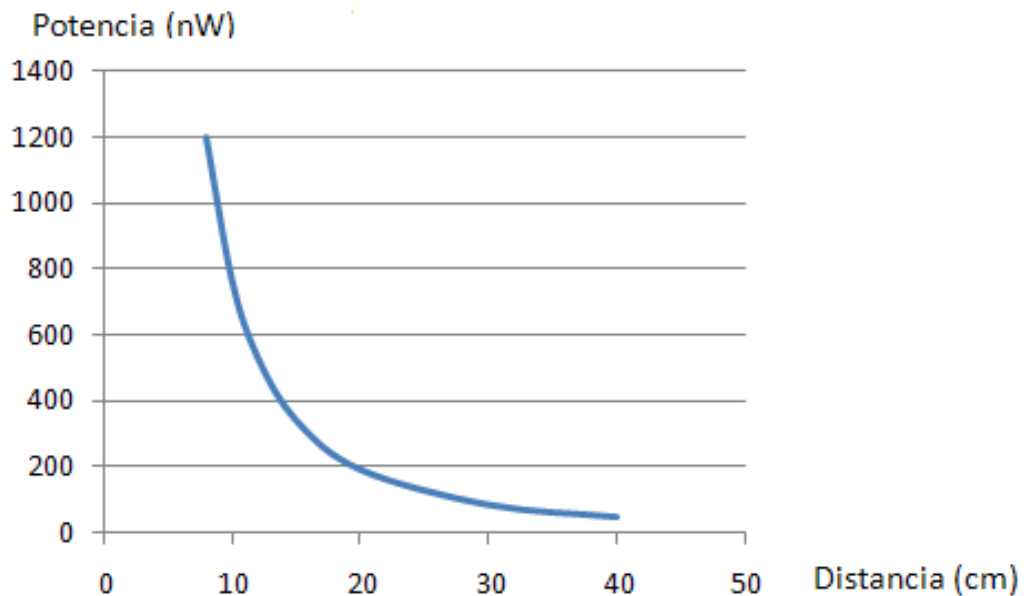


Figura 38 - Curva experimental obtenida por Matlab

5.4. Comparativa.

En la primera gráfica observamos los resultados teóricos realizados al principio del proyecto y debajo los resultados experimentales obtenidos.

En ambos casos vemos que las dos gráficas tienden a ser una exponencial decreciente, los valores recibidos de potencia son diferentes para cada caso, siendo en los resultados teóricos de un orden mayor de magnitud.



5.5. Conclusiones.

Obtenemos el comportamiento del fotodiodo a través de 2 pruebas distintas, mediante las cuales obtenemos:

- Capacitancia del fotodiodo
- Respuesta del fotodiodo al variar señal de entrada
- En función del ángulo de recepción del fotodiodo ver como varía la tensión de salida a una frecuencia fija.

Realizamos una serie de muestreos a través de nuestro fotodiodo que nos permitirá obtener el comportamiento del sistema, es decir, como varia la potencia recibida en función de la distancia. Estos resultados serán vistos gráficamente, obteniendo resultados similares a los de una exponencial, cosa a esperar.

Capítulo 6

Conclusiones finales.

Vemos la fiabilidad del sistema frente a su uso comercial y práctico.
Además veremos algunas mejoras que se podrían incorporar a dicho sistema de cara al futuro.

6.1 Viabilidad .

Pese a ser distintos los valores de las magnitudes calculadas teóricamente y las magnitudes experimentales no supone ningún impedimento a la hora de poder utilizar dicho sistema para su uso como caso práctico, dado que vemos que los resultados son prácticamente los esperados.

Hay que tener en cuenta que al realizar un sistema experimental hay factores que limitan que el sistema sea ideal, como en el caso teórico, por eso las medidas de potencia son de un orden inferior a las teóricas.

Hemos conseguido describir el sistema para un blanco difusor, que en nuestro caso sería el hielo, caracterizándolo a través de la siguiente ecuación:

$$P = 5.4245 + 0.4922 * D^{-2}$$

Mediante la cual podemos dotar a nuestro sistema de unas medidas fiables que a la hora de tener uso práctico puedan proporcionarnos información sin apenas margen de error.

6.2 Mejoras futuras.

Se proponen algunos aspectos a tratar de cara al futuro, para poder mejorar dicho sistema:

- 1 - Trabajar a diferentes longitudes de onda.
- 2 – Trabajar tomando ángulos de reflexión reales, no ideales.
- 2 - Integrar sistema en un medio más compacto como pudiera ser una FPGA.
- 3 - Amplificar la señal recibida a unos valores más aptos para su medición.
- 4 - Dotar al sistema de una inmunidad frente a factores externos que pudiera perturbar la señal transmitida y afectar a los circuitos electrónicos.

6.3 Objetivos conseguidos.

Se ha conseguido desarrollar un sistema capaz de detectar la presencia de hielo simulando un blanco difusor (superficie de papel). Para ello hemos tenido que realizar un estudio teórico de cómo se comportaría dicho sistema frente a un cierto tipo de señales.

Después de diseñar el circuito con los elementos ópticos y optoelectrónicos necesarios para el mejor funcionamiento del mismo, hemos realizado un estudio experimental.

Mediante este estudio hemos obtenido unos resultados que describimos mediante la herramienta matemática Matlab que nos proporciona la forma para describir el sistema relacionando dos términos, la potencia recibida por el fotodiodo en función de la distancia con el punto de reflexión.

Con todo ello vemos como los resultados son los esperados, el sistema es viable de cara a su mejora y comercialización.

Capítulo 7

Presupuesto.

El siguiente presupuesto muestra los gastos del desarrollo del proyecto, tanto los costes de mano de obra empleados para desarrollar el mismo, como los costes de material y de equipos empleados, así como un resumen del gasto total del proyecto.

| Coste de mano de obra | | | |
|------------------------------|----------------|----------|-----------------|
| Descripción | Coste unitario | Cantidad | Importe total |
| Ingeniero Técnico Industrial | 48 €/h | 550 h | 26.400 € |
| Personal de oficina técnica | 17 €/h | 10 h | 170 € |
| Total | | | 26.570 € |

| Coste de material | | | |
|---------------------------|----------------|----------|-----------------|
| Descripción | Coste unitario | Cantidad | Importe total |
| IC-VJZ (placa de pruebas) | 50 € | 1 | 50 € |
| IC-VJZ | 5 € | 2 | 10 € |
| SM05PD6A | 149,50 € | 1 | 149,50 € |
| FU-450SDF | 275 € | 1 | 275 € |
| F810FC-1550 | 180 € | 1 | 180,00 € |
| AD630 | 20 € | 2 | 40 € |
| Resistencias | 0,03 € | 45 | 1,35 € |
| Condensadores | 0,06 € | 39 | 2,34 € |
| Potenciómetro | 0,23 € | 5 | 1,15 € |
| TL082 | 0,42 € | 3 | 1,26 € |
| Diodo | 0,56 € | 2 | 1,12 € |
| Bobina | 1,45 € | 1 | 1,45 € |
| Zócalos varios | 0,25 € | 6 | 1,50 € |
| RS-1212D | 20,90 € | 1 | 20,90 € |
| UAF42/BB | 17,95 € | 1 | 19,95 € |
| LF356 | 0,70 € | 3 | 2,10 € |
| TL780-05C | 1,57 € | 1 | 1,57 € |
| Equipo vario laboratorio | 90 € | 1 | 90 € |
| LC2969 | 20 € | 1 | 20 € |
| Total | | | 869,19 € |

| Coste de equipos | | | |
|------------------------|----------------|----------|----------------|
| Descripción | Coste unitario | Cantidad | Importe total |
| Lock-in amplifier | 4.500 € | 1 | 4.500 € |
| Osciloscopio Digital | 550 € | 1 | 550 € |
| Fuente de alimentación | 320 € | 1 | 320 € |
| Generador de señal | 225 € | 1 | 225 € |
| Varios | 150 € | 1 | 150 € |
| Total | | | 5.745 € |

| Resumen | |
|--------------------------|--------------------|
| Descripción | Importe total |
| Coste de mano de obra | 26.570 € |
| Coste material | 869,19 € |
| Coste equipos | 5.745 € |
| I.V.A (18 %) | 5.969,55 € |
| Total presupuesto | 39.153,74 € |

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de TREINTA Y NUEVE MIL CIENTO CINCUENTA Y TRES EUROS CON SETENTA Y CUATRO CÉTAMOS DE EURO.

Leganés 18 de febrero de 2012

El ingeniero proyectista

Fdo. Pablo Blázquez Campo

Capítulo 8

Referencias.

Libros

[1] E. Hecht. Optics. Addison Wesley. 2001.

Artículos

[1] Pfisterer, Richard N. Approximated Scatter Models for Stray Light Analysis. Octubre 2011.

Proyectos

Alonso Bogas, Luis Manuel. *Desarrollo de un sensor óptico para de agua y hielo para la monitorización de carreteras*. Octubre 2010.

Díaz García, Abraham de los Ángeles. *Estudio de la viabilidad de un sensor óptico de agua y hielo basado en la variación del coeficiente de absorción*. Octubre 2010.

Martin Mateos, Pedro. *Sensor óptico de hielo por birrefringencia*. Abril 2010.

Hojas de catálogo

[2] TIL32, <http://www.datasheetarchive.com/TIL32-datasheet.html>

[3] FU-450SDF, <http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/182945/MITSUBISHI/FU-450SDF-L4M60C.html>

[4] SM05PD6A, <http://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD6A>

[5] F810FC-1550, <http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=F810FC-1550>

[6] LC2969, <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/679.PDF>

[7] ICVJZ, http://www.ichaus.de/upload/pdf/Vj_a1es.pdf

[8] Lock-in amplifier, <http://www.thinksrs.com/products/SR810830.htm>

Capítulo 9

Anexos.

| Distancia (cm) | Corriente 1 (nA) | Desfase 1 (°) | Corriente 2 (nA) | Desfase 2 (°) | Corriente 3 (nA) | Desfase 3 (°) | Corriente 4 (nA) | Desfase 4 (°) | Corriente 5 (nA) | Desfase 5 (°) | Corriente 6 (nA) | Desfase 6 (°) | Corriente 7 (nA) | Desfase 7 (°) | Corriente 8 (nA) | Desfase 8 (°) |
|----------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| 8 | 80,12 | 16,94 | 80,36 | 17,14 | 81,86 | 20,3 | 78,86 | 18,38 | 76,81 | 17,89 | 74,7 | 17,61 | 73,31 | 17,3 | 73,07 | 16,99 |
| 10 | 59,4 | 16,73 | 60,44 | 17,03 | 62,38 | 20,09 | 60,04 | 18,3 | 59,65 | 17,82 | 57,38 | 17,54 | 56,85 | 17,26 | 55,77 | 16,94 |
| 12 | 46,32 | 16,78 | 46,32 | 17,04 | 49,32 | 20,05 | 46,79 | 18,36 | 45,71 | 17,89 | 45,15 | 17,57 | 44,7 | 17,32 | 43,23 | 17,02 |
| 14 | 36,8 | 16,84 | 36,84 | 17,2 | 37,67 | 20,24 | 36,93 | 18,52 | 36,1 | 18,09 | 35,91 | 17,77 | 35,92 | 17,48 | 34,92 | 17,15 |
| 16 | 28,24 | 17,2 | 29,5 | 17,52 | 31,67 | 20,17 | 29,86 | 18,71 | 29,42 | 18,35 | 29,04 | 18,02 | 28,54 | 17,75 | 27,85 | 17,49 |
| 18 | 22,37 | 17,3 | 24,37 | 17,8 | 25,01 | 20,38 | 24,06 | 18,98 | 23,64 | 18,64 | 23,36 | 18,36 | 23,33 | 18,02 | 22,69 | 17,73 |
| 20 | 18,67 | 17,4 | 20,45 | 18,12 | 21,17 | 20,48 | 19,97 | 19,34 | 20,18 | 18,92 | 19,46 | 18,72 | 19,53 | 18,45 | 19,09 | 18,02 |
| 22 | 16,63 | 17,54 | 17,45 | 18,43 | 17,92 | 20,84 | 17,37 | 19,63 | 16,72 | 19,38 | 16,44 | 19,08 | 16,42 | 18,7 | 16,09 | 18,38 |
| 24 | 14,7 | 17,75 | 15,29 | 19,28 | 15,32 | 20,52 | 14,23 | 19,9 | 14,3 | 19,8 | 15,43 | 21,23 | 14,69 | 20,24 | 14,88 | 21,45 |
| 26 | 11,9 | 18,09 | 12,88 | 19,77 | 12,11 | 19,2 | 11,89 | 19,65 | 11,93 | 19,93 | 13,05 | 25,41 | 12,97 | 24,25 | 12,55 | 23,41 |
| 28 | 10,09 | 18,22 | 11,28 | 20,2 | 10,56 | 19,59 | 10,58 | 20,15 | 10,5 | 20,18 | 11,56 | 25,92 | 11,27 | 25,06 | 11,04 | 24,02 |
| 30 | 8,99 | 18,61 | 10,03 | 20,59 | 9,42 | 20,37 | 9,3 | 20,73 | 9,39 | 20,55 | 10,11 | 26,91 | 10,06 | 25,81 | 9,8 | 24,64 |
| 32 | 8,03 | 18,83 | 8,75 | 21,03 | 8,42 | 20,99 | 8,46 | 21,31 | 8,51 | 21,05 | 9,01 | 27,43 | 8,91 | 26,55 | 8,68 | 25,52 |
| 34 | 7,06 | 19,3 | 7,79 | 21,77 | 7,35 | 21,71 | 7,44 | 21,95 | 7,47 | 21,82 | 7,97 | 28,43 | 7,95 | 27,4 | 7,73 | 26,38 |
| 36 | 6,13 | 19,71 | 6,92 | 22,27 | 6,52 | 22,34 | 6,69 | 22,72 | 6,72 | 22,54 | 7,01 | 29,45 | 6,93 | 28,45 | 6,82 | 27,49 |
| 38 | 5,65 | 19,98 | 6,32 | 22,84 | 6,05 | 22,88 | 5,95 | 23,59 | 6 | 23,22 | 6,35 | 30,47 | 6,36 | 29,34 | 6,18 | 28,52 |
| 40 | 5,14 | 20,52 | 5,85 | 23,55 | 5,52 | 23,55 | 5,45 | 24,24 | 5,47 | 23,99 | 5,71 | 31,54 | 5,73 | 30,43 | 5,62 | 29,34 |

Tabla 9 - Primera medición completa con FU-450SDF

| Distancia (cm) | Corriente 1 (nA) | Desfase 1 (°) | Corriente 2 (nA) | Desfase 2 (°) | Corriente 3 (nA) | Desfase 3 (°) | Corriente 4 (nA) | Desfase 4 (°) | Corriente 5 (nA) | Desfase 5 (°) | Corriente 6 (nA) | Desfase 6 (°) | Corriente 7 (nA) | Desfase 7 (°) | Corriente 8 (nA) | Desfase 8 (°) |
|----------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| 8 | 76,55 | 18,8 | 77,79 | 18,28 | 75,38 | 17,8 | 75,51 | 17,63 | 74,8 | 17,55 | 72,69 | 17,2 | 72,72 | 17,24 | 73,44 | 16,93 |
| 10 | 61,11 | 18,7 | 60,49 | 18,24 | 57,67 | 17,88 | 56,48 | 17,72 | 57,67 | 17,57 | 55,86 | 17,38 | 56,92 | 17,27 | 57,63 | 16,94 |
| 12 | 47,66 | 18,88 | 45,77 | 18,48 | 46,67 | 18,02 | 45,62 | 17,84 | 45,03 | 17,84 | 43,93 | 17,53 | 44,48 | 17,5 | 44,31 | 17,03 |
| 14 | 37,49 | 19,1 | 36,37 | 18,75 | 36,29 | 18,34 | 35,67 | 18,19 | 35,18 | 18,05 | 35,23 | 17,89 | 34,92 | 17,88 | 35,38 | 18,51 |
| 16 | 29,9 | 19,52 | 29,21 | 19,13 | 28,61 | 18,74 | 28,17 | 18,63 | 27,85 | 18,55 | 28,04 | 18,29 | 27,85 | 18,23 | 27,9 | 19,2 |
| 18 | 24,11 | 20,05 | 23,89 | 19,63 | 23,58 | 19,21 | 23,02 | 19,09 | 23,06 | 18,98 | 22,91 | 18,76 | 22,72 | 18,77 | 23,01 | 19,88 |
| 20 | 20,93 | 20,46 | 20,38 | 20,12 | 19,75 | 19,7 | 19,78 | 19,55 | 19,69 | 19,47 | 18,89 | 19,37 | 18,95 | 19,3 | 19,24 | 18,95 |
| 22 | 17,1 | 21,15 | 16,78 | 20,78 | 16,28 | 20,42 | 16,75 | 20,07 | 16,47 | 20,09 | 16,24 | 19,91 | 16,46 | 19,63 | 16,16 | 19,52 |
| 24 | 14,85 | 20,56 | 13,26 | 21,43 | 13,95 | 21,73 | 14,56 | 21,23 | 14,41 | 21,61 | 13,95 | 20,01 | 14,12 | 19,95 | 13,52 | 21,03 |
| 26 | 12,17 | 20,26 | 11,93 | 22,95 | 11,95 | 22,97 | 12,06 | 22,9 | 12,13 | 22,93 | 12,27 | 20,31 | 12,36 | 20,3 | 12,35 | 20,24 |
| 28 | 10,5 | 20,98 | 10,24 | 24,05 | 10,35 | 23,73 | 10,58 | 23,84 | 10,46 | 23,93 | 10,58 | 21,01 | 10,82 | 20,98 | 10,67 | 20,99 |
| 30 | 9,27 | 21,63 | 9,14 | 25,04 | 8,99 | 25,2 | 9,3 | 24,88 | 9,28 | 14,72 | 9,27 | 21,77 | 9,44 | 21,89 | 9,49 | 21,73 |
| 32 | 8,29 | 22,41 | 8,08 | 26,14 | 8,05 | 26,24 | 8,19 | 26,11 | 8,11 | 26,16 | 8,31 | 22,72 | 8,45 | 22,45 | 8,37 | 22,47 |
| 34 | 7,41 | 23,04 | 7,22 | 27,34 | 7,17 | 27,48 | 7,29 | 27,08 | 7,27 | 27,29 | 7,36 | 23,59 | 7,52 | 23,3 | 7,55 | 23,22 |
| 36 | 6,62 | 24,02 | 6,34 | 28,87 | 6,35 | 28,83 | 6,52 | 58,49 | 6,48 | 28,64 | 6,61 | 24,54 | 6,72 | 24,46 | 6,74 | 24,13 |
| 38 | 5,98 | 24,93 | 5,76 | 30,03 | 5,7 | 30,22 | 5,89 | 29,68 | 5,81 | 30,02 | 5,9 | 25,55 | 6,05 | 25,02 | 6,03 | 25,08 |
| 40 | 5,44 | 25,69 | 5,18 | 31,52 | 5,15 | 31,61 | 5,25 | 31,28 | 5,27 | 31,32 | 5,51 | 25,95 | 5,49 | 25,97 | 5,55 | 26,11 |

Tabla 10 - Segunda medición completa con FU-450SD

